

# КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ

*Учебное пособие (подготовиться к экзамену)*

## Учебный план

### ТЕМА 1.

#### Системы автоматического контроля

§ 1.1. Системы автоматического контроля. ....	6
---	---

### ТЕМА 2.

#### Измерительные преобразователи и средства измерений

§ 2.1. Классификация измерительных преобразователей .....	17
§ 2.2. Электрические измерительные преобразователи .....	18
§ 2.3. Пневматические измерительные преобразователи .....	22
§ 2.4. Электропневматические и пневмоэлектрические измерительные преобразователи .....	28
§ 2.5. Средства измерений .....	30

### ТЕМА 3.

#### Контроль давления

§ 3.1. Общие сведения .....	36
§ 3.2. Жидкостные манометры .....	39
§ 3.3. Деформационные приборы .....	44
§ 3.4. Грузопоршневой манометр .....	49
§ 3.5. Электрические манометры .....	51
§ 3.6. Пневматические манометры .....	55
§ 3.7. Выбор, установка и защита от коррозии средств измерения давления .....	59

### ТЕМА 4.

#### Контроль количества и расхода материалов

§ 4.1. Основные понятия. Единицы измерения .....	63
§ 4.2. Измерение количества жидкости и газа .....	64
§ 4.3. Измерение количества твердых веществ .....	73
§ 4.4. Измерение расхода методом переменного перепада давления .....	77
§ 4.5. Расходомеры постоянного перепада давлений .....	93
§ 4.6. Прочие расходомеры .....	101

## **ТЕМА 5.**

### **Контроль уровня жидкостей и сыпучих материалов**

§ 5.1. Измерение уровня жидкости .....	109
§ 5.2. Измерение уровня сыпучих тел .....	126

## **ТЕМА 6.**

### **Контроль температуры**

§ 6.1. Классификация приборов контроля температуры.....	130
§ 6.2. Термометры расширения и манометрические термометры .....	132
§ 6.3. Электрические термометры сопротивления .....	144
§ 6.4. Термоэлектрические термометры .....	155
§ 6.5. Пирометры излучения.....	172

## **ТЕМА 7**

### **Контроль качества и состава материалов**

§ 7.1. Основные понятия .....	180
§ 7.2. Измерение концентрации растворов .....	182
§ 7.3. Измерение концентрации водородных ионов в растворах (рН-метрия).....	192
§ 7.4. Измерение плотности жидкости .....	195
§ 7.5. Измерение влажности газов и твердых материалов.....	206
§ 7.6. Измерение вязкости жидкости .....	213
§ 7.7. Газовый анализ .....	220

### **Лабораторные работы**

Лабораторная работа № 1. Исследование характеристик пирометрического милливольтметра.....	240
Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик автоматического потенциометра.....	249
Лабораторная работа № 3. Исследование характеристик и поверка автоматического моста.....	262
Лабораторная работа № 4. Исследование характеристик и режимов работы логометра .....	270
Лабораторная работа № 5. Деформационные приборы измерения давления .....	282
Лабораторная работа № 6. Исследование систем дистанционных передач.....	292

## **ТЕМА № 1**

### **Системы автоматического контроля и основы метрологии**

#### **§ 1.1. Системы автоматического контроля**

Системой автоматического контроля называют систему, состоящую из объекта контроля и различных устройств, выполняющих функции измерения. Под объектом контроля понимают агрегат или процесс, в котором одну или несколько величин измеряют.

В большинстве случаев система автоматического контроля одной величины включает четыре элемента:

- объект,
- чувствительный элемент,
- линию связи,
- измерительное устройство.

Чувствительный элемент устанавливают непосредственно в объекте контроля, он воспринимает величину контролируемого (измеряемого) параметра и преобразует ее в соответствующий сигнал, поступающий по линии связи к измерительному устройству. Структурная схема такой системы показана на рис. 1.1, где каждый из элементов представлен прямоугольником; стрелки между прямоугольниками показывают направление передачи сигналов с одного элемента на другой. Элементы характеризуются сигналами на входе и выходе, называемыми также входными и выходными сигналами. Здесь передача сигнала идет в одном направлении, т. е. от объекта к измерительному устройству. Такие системы автоматического контроля называют *разомкнутыми*. В некоторых системах контроля чувствительный элемент является элементом измерительного устройства. В этом случае линия связи между чувствительным и измерительным элементами отсутствует, а структурные схемы системы контроля соответствуют схемам, приведенным на рис. 1.2.

Если измерительный прибор, например термометр или манометр (прибор для измерения давления), устанавливают непосредственно на объекте, то системе контроля соответствует схема на рис. 1.2, а. Если же измерительный прибор, например манометр, установлен на небольшом расстоянии от объекта и соединен с объектом линией связи (трубкой), то системе контроля соответствует схема на рис. 1.2, б.

Системы автоматического контроля подразделяются на местные, дистанционные и телеизмерительные.

Системы контроля, в которых измерительные устройства расположены вблизи объекта (вблизи места установки чувствительного элемента), называются *местными*.

Автоматический контроль можно осуществлять и на расстоянии от контролируемого объекта, удлинив линию связи между чувствительным элементом и измерительным устройством. В этих случаях система местного контроля усложняется введением в измерительное устройство преобразователя для преобразования результата измерения в пропорциональный пневматический или электрический сигнал.



Рис. 1.1. Структурная схема системы автоматического контроля:

0 — объект; ЧЭ — чувствительный элемент;

ЛС — линия связи; ИУ — измерительное устройство

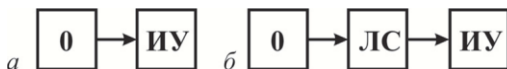


Рис. 1.2. Структурные схемы систем автоматического контроля

без чувствительных элементов (обозначения те же, что и на

рис. 1.1): а — прибор установлен на объекте;

б — прибор установлен вне объекта

Последний содержит информацию о величине измеряемого параметра и по соответствующей линии связи передает ее другому измерительному устройству, расположенному на расстоянии от объекта контроля. Во втором

измерительном приборе осуществляется обратное преобразование сигнала, переданного по линии связи, в результат измерения. Подобная система автоматического контроля называется *дистанционной*. Таким образом, дистанционная система контроля имеет два измерительных устройства: первичный и вторичный приборы.

В зависимости от вида используемой энергии дистанционные системы подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические.

В *пневматических системах* используется энергия сжатого воздуха. К первичному прибору подводится воздух под постоянным избыточным давлением 0,14 МПа (1,4 кгс/см<sup>2</sup>), а на его выходе давление изменяется в зависимости от величины измеряемого параметра в пределах от 0,02 до 0,1 МПа (от 0,2 до кгс/см<sup>2</sup>).

В *электрических системах* используется электроэнергия. В первичном приборе результат измерения преобразуется в силу или напряжение постоянного электрического тока или напряжение переменного электрического тока, величины которых пропорциональны результату измерения. В электрических системах дистанционной передачи используются также частотные преобразователи, которые преобразуют результат измерения в пропорциональную величину частоты переменного тока.

В химической, нефтехимической и промышленности по производству минеральных удобрений в основном применяют пневматические дистанционные системы автоматического контроля. Электрические системы используют значительно реже, а гидравлические не применяют вообще.

Для передачи результатов измерения на расстояние десятков и сотен километров применяют *телеизмерительные системы* контроля. В таких системах результат измерения при помощи преобразователя в первичном приборе преобразуется в кодированные, обычно дискретные сигналы, передаваемые по каналу (линии) связи. Во вторичном

приборе, установленном на другом конце канала связи, эти сигналы преобразуются в результат измерения и фиксируются в цифровой или аналоговой форме.

В сфере управления сложными производственными процессами находят применение системы централизованного контроля. В этом случае вторичные приборы устанавливаются на центральном щите. В крупных цехах с большим числом точек контроля центральный щит может достигать десятков метров в длину и становиться недоступным для обозрения оператора. Для наилучшей организации централизованного контроля применяют специальные машины — машины централизованного контроля (МЦК), которые собирают и автоматически обрабатывают информацию при контроле сложных производственных процессов.

Выходная информация, которая используется для воздействия на контролируемый процесс, называется оперативной. Чтобы сократить выходную информацию о большинстве контролируемых величин, ее можно заменить сигнализацией, которая включается только тогда, когда какая-либо контролируемая величина достигает некоторого наперед заданного значения. Обычно при отклонении контролируемого параметра от заданного значения машина выдает световой (зажигание или мигание лампочки) или звуковой (звонок, гонг) сигнал. Значения контролируемых величин могут быть также получены оператором по вызову. Отклонения контролируемых параметров от установленных пределов измерения по вызову регистрируются в непрерывной или цифровой форме.

## **ТЕМА № 2**

### **Измерительные преобразователи и средства измерений**

#### **§ 2.1. Классификация измерительных преобразователей**

Устройства этой группы Государственной системы приборов (ГСИ) должны реагировать на изменения контролируемого параметра и выдавать на выходе унифицированный сигнал. Преобразователи, входящие в эту группу в соответствии с РМГ 29-2013 ГСИ, можно подразделить на первичные измерительные преобразователи, масштабные измерительные преобразователи, нормирующие и передающие измерительные преобразователи (два последних здесь не рассматриваются).

Первичный измерительный преобразователь переводит контролируемый параметр в выходную физическую величину (перемещение, усилие, сопротивление, напряжение, силу тока, частоту). Выходная физическая величина, полученная из контролируемой простым — «естественным» — преобразованием, называется *естественной выходной величиной* (или естественным выходным сигналом).

Нормирующий преобразователь переводит естественный выходной сигнал в унифицированный. Если на выходе первичного измерительного преобразователя, чувствительный элемент которого непосредственно воспринимает изменения контролируемого параметра, выдается пневматический или электрический сигнал, то нормирующий преобразователь обычно представляет собой отдельное самостоятельное устройство. Если же первичный преобразователь выдает сигнал в виде усилия, перемещения или какой-нибудь другой физической величины, по своей природе отличающейся от электрической или пневматической, то измерительный

и нормирующий преобразователи объединяют конструктивно в один прибор. Оба решения находят широкое применение в практике создания преобразователей для систем автоматизации. В системе ГСП разработан унифицированный ряд взаимозаменяемых пневматических и электрических первичных преобразователей блочного типа с силовой компенсацией. Используя этот ряд преобразователей, можно значительное количество различных измеряемых параметров сравнительно просто и с достаточной точностью преобразовать в одну естественную выходную величину — усилие.

Пневматические первичные измерительные преобразователи имеют выходной сигнал 0,02–0,1 МПа (0,2–1,0 кгс/см<sup>2</sup>), электрические — 0–20 и 0–5 мА постоянного тока. Компенсационный принцип действия этих преобразователей обеспечивает их высокие метрологические характеристики и простоту перенастройки в большом интервале пределов измерений. Каждый первичный преобразователь состоит из унифицированного электрического или пневматического преобразователя усилия и измерительного блока.

Класс точности унифицированных преобразователей в основном 0,6 или 1,0, и лишь для некоторых 1,6 и 2,5.

## **§ 2.2. Электрические измерительные преобразователи**

Из электрических аналоговых преобразователей, выполняемых по схеме компенсации перемещений для преобразования неэлектрических величин в электрический выходной сигнал и передачи показаний на расстояние, наибольшее применение нашли дифференциально-трансформаторные, ферродинамические, магнитомодуляционные и сельсинные преобразователи.

В дифференциально-трансформаторных преобразователях перемещение сердечника первичного прибора уравновешивается известным перемещением сердечника вторичного



прибора. Дифференциально-трансформаторные преобразователи используются при измерении давления, уровня, расхода и некоторых других параметров.

Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя (рис. 2.1) состоит из двух одинаковых катушек, одна из которых находится в первичном приборе 1, а другая — во вторичном приборе 2. Первичные обмотки катушек включены последовательно и питаются напряжением переменного тока от обмотки силового трансформатора электронного усилителя. Вторичные обмотки включены одна навстречу другой с выходом на электронный усилитель. Внутри катушек находятся железные плунжеры (магнитопроводы) *М*. Если плунжеры обеих катушек находятся в среднем положении, то величины ЭДС, наводимые в катушках, равны между собой. При рассогласовании положений плунжеров величины ЭДС, наводимые в катушках, неравны между собой.

Разность этих ЭДС усиливается в электронном усилителе до величины, необходимой для управления реверсивным двигателем *РД*. Последний через профилированный диск 3 перемещает плунжер в катушке вторичного прибора в положение, согласованное с положением плунжера в катушке первичного прибора, что приводит к равенству ЭДС, наводимых в обеих катушках, а, следовательно, к новому состоянию равновесия. При этом результирующая ЭДС вторичных обмоток будет снова равна нулю, и реверсивный двигатель остановится. Одновременно реверсивный двигатель связан со стрелкой и пером вторичного прибора.

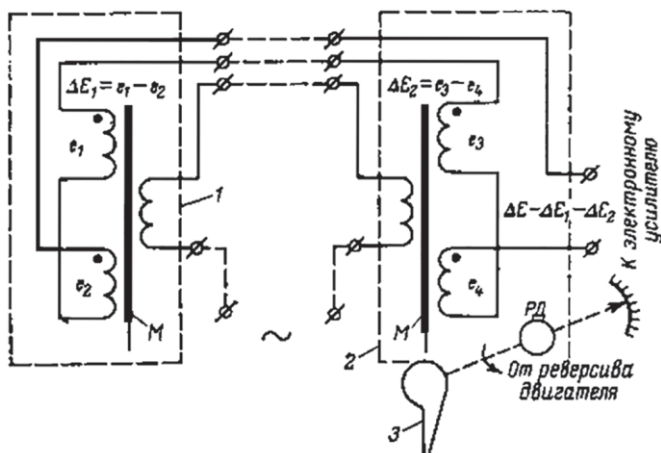


Рис. 2.1. Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя

При перемещении плунжера первичного прибора на расстояние до 5 мм зависимость индуктированной ЭДС практически линейна. Вторичные приборы дифференциально-трансформаторной системы построены на базе автоматических потенциометров.

В электрических преобразователях аналоговой ветви ГСП используют электросиловые преобразователи двух типов: *линейный*, обеспечивающий прямо пропорциональную (линейную) зависимость между усилием и выходным сигналом, и *квадратичный*, выходной сигнал которого пропорционален корню квадратному из усилия. Преобразователи комплектуют усилителем типа УП-20, выполненным в виде отдельного блока.

Принципиальная схема линейного преобразователя представлена на рис. 2.2. Усилие  $Q$ , которым измерительный блок воздействует на преобразователь, вызывает незначительное перемещение рычажной системы 4 передаточного механизма и связанного с ней управляющего флажка 5 индикатора рассогласования. Индикатор рассогласования дифференциально-трансформаторного типа преобразует это

перемещение в управляющий сигнал переменного тока, поступающий на вход электронного усилителя 1. Выходной сигнал усилителя в виде постоянного тока поступает в катушку 2 силового устройства и одновременно в последовательно соединенную с ней линию дистанционной передачи.

В линейном преобразователе при взаимодействии постоянного магнита 3 с магнитным полем, создаваемым током, протекающим в катушке 2, создается пропорциональное силе тока усилие, уравнивающее через рычажную систему входное усилие.

В квадратичном преобразователе сила, с которой втягивается ферромагнитный проводник в поле, создаваемое неподвижным электромагнитом, пропорциональна квадрату силы тока, протекающего по катушке.

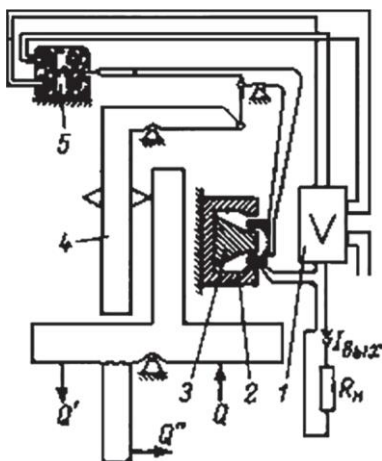


Рис. 2.2. Принципиальная схема электросилового линейного преобразователя

Линейный и квадратичный преобразователи различаются только устройством обратной связи силового механизма.

Конструкция преобразователя позволяет присоединять к нему измерительные блоки, создающие усилия в разных направлениях:  $Q'$ ,  $Q''$  или  $Q$ . Дистанционная передача сигнала может достигать 10 км.

Подключаемые к преобразователю вторичные приборы можно разделить на две группы: работающие от унифицированного сигнала постоянного тока (миллиамперметры, приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем) и работающие от сигнала постоянного напряжения (вольтметры, промышленные потенциометры, электрические машины централизованного контроля и управления).

Приборы первой группы (токовые) подключают к электронному усилителю преобразователя в разрыв электрической цепи двухпроводной линии связи (приборы этой группы соединены последовательно). Приборы второй группы (приборы постоянного напряжения) подключают параллельно нагрузочному сопротивлению  $R_n$ , включенному в цепь двухпроводной линии связи.

### § 2.3. Пневматические измерительные преобразователи



Рис. 2.3. Пневмопреобразователь типа «сопло — заслонка»

В пневматических преобразователях основным элементом является система «сопло — заслонка» (рис. 2.3). В трубку 1 небольшого диаметра непрерывно поступает воздух под давлением  $P_0$ . Проходя

через дроссель постоянного сечения в атмосферу через дроссель 3 (сопло), перед которым находится заслонка 4. Если изменить зазор  $\Delta x$  между соплом и заслонкой, то давление  $P$  междроссельном пространстве будет также изменяться: увеличиваться с приближением заслонки к соплу и уменьшаться при удалении заслонки от сопла. Изменение давления  $P_1$  контролируется манометром 5.

Зависимость между зазором  $\Delta x$  и давлением  $P_1$  показана на рис. 2.4. Как видно из графика, весьма небольшие перемещения заслонки (до 0,08 мм) вызывают значительные — от 10 до 110 кПа — изменения давления воздуха  $P_1$ .

**Преобразователи силовой компенсации.** Для непрерывного преобразования абсолютного, избыточного и вакуумметрического давления (разрежения, перепада давления), расхода, температуры жидкостей и газов, уровня, плотности жидкости и некоторых других параметров в пневматический сигнал дистанционной передачи предназначены преобразователи, основанные на принципе силовой компенсации. В этих преобразователях измеряемый параметр воздействует на чувствительный элемент измерительного блока и преобразуется в усилие, которое автоматически уравнивается усилием, развиваемым давлением воздуха в сильфоне обратной связи. Это давление является одновременно выходным сигналом преобразователя.

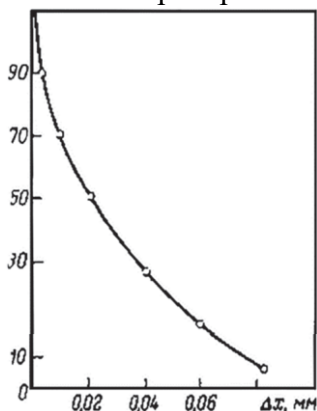


Рис. 2.4. Зависимость давления  $P_1$  в междроссельном пространстве системы «сопло — заслонка» от зазора  $\Delta x$  между соплом и заслонкой

Принципиальная схема преобразователя представлена на рис. 2.5. Усилие  $Q$ , которым измерительный блок воздействует на преобразователь, вызывает незначительное перемещение рычажной системы 1 передаточного механизма и связанной с ней заслонки 3 относительно неподвижного сопла 2. Возникший в линии сопла сигнал управляет

давлением, поступающим с пневмоусилителя в сильфон 4 обратной связи.

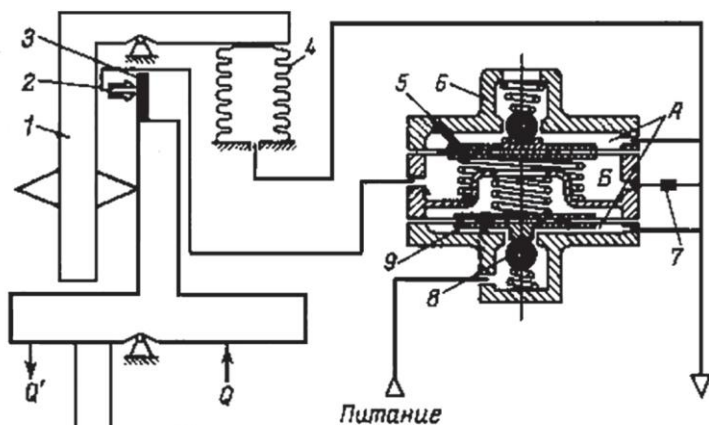


Рис. 2.5. Принципиальная схема пневматического силового преобразователя

Конструкция преобразователя позволяет присоединять к нему измерительные блоки, создающие усилие в разных направлениях:  $Q$ ,  $Q'$  или  $Q''$ . Усилитель (пневмореле) состоит из трех секций, разделенных мембранами из прорезиненного полотна, которые образуют две камеры давления командного воздуха  $A$  и камеру линии сопла  $B$ . Повышение давления в линии сопла вызывает перемещение мембран 5 и 9, и клапан 8 открывается. При этом давление командного воздуха повышается на величину, равную величине повышения давления в линии сопла, возникает постоянный перепад на дросселе 7 и влияние изменения давления питания значительно уменьшается. При уменьшении давления в линии сопла шариковый клапан 8 закрывается, клапан сброса 6 открывается и давление командного воздуха уменьшается. Преобразователь обеспечивает дистанционную передачу выходного сигнала по пневмотрассе длиной до 300 м. Класс точности преобразователя 1,0.

Преобразователь типа ПП предназначен для преобразования угловых перемещений в пропорциональный пневматический сигнал. Его используют в качестве выходного преобразователя в приборах и устройствах частотно-ферродинамической системы, устанавливаемых в схемах автоматического управления производственными процессами. Принципиальная схема преобразователя приведена на рис. 2.6.

Угловое перемещение сектора 1 через ось 2 передается барабану 3. При помощи гибкой ленты 9, связанной с барабаном и огибающей отклоняющий ролик 8, угол поворота барабана преобразуется в пропорциональное усилие пружины 7. Усилие, развиваемое пружиной, через рычаг 6 воздействует на заслонку 15 пневмоусилителя.

Основным элементом пневмоусилителя является сопло-заслонка. Питающий воздух из линии поступает в камеру I и через постоянный дроссель 4 в камеру II. Давление в камере II зависит от количества воздуха, поступающего в эту камеру через дроссель 4, и расхода его через сопло 14.

Если усилие  $P$ , действующее на заслонку 15 со стороны рычага 6, равно нулю, то дросселирование в сопло 14 весьма незначительно и давление в камере II приближается к атмосферному. При этом усилие, действующее на мембранную систему 13 снизу вверх, меньше, чем усилие пружины 12, и полый шток 11 попадает в камеру IV, соединенную с атмосферой.

При увеличении усилия  $P$ , изменяющегося пропорционально углу поворота входной оси 2, сопло 14 в большей степени прикрывается заслонкой 15. Зазор уменьшается, что создает дополнительное сопротивление истечению воздуха через сопло. Поэтому давление в камере II превышает давление в камере III, и мембранная система 13 перемещается вверх. Полый шток 11 упирается в тарельчатый клапан 10, закрывая выход в атмосферу, и приподнимает его, открывая доступ питающему воздуху из камеры I в камеру III. Давление в камере III, являющееся одновременно выходным, увеличивается

до величины, при которой усилия, действующие на мембранную систему  $I_3$  снизу вверх и сверху вниз, уравниваются.

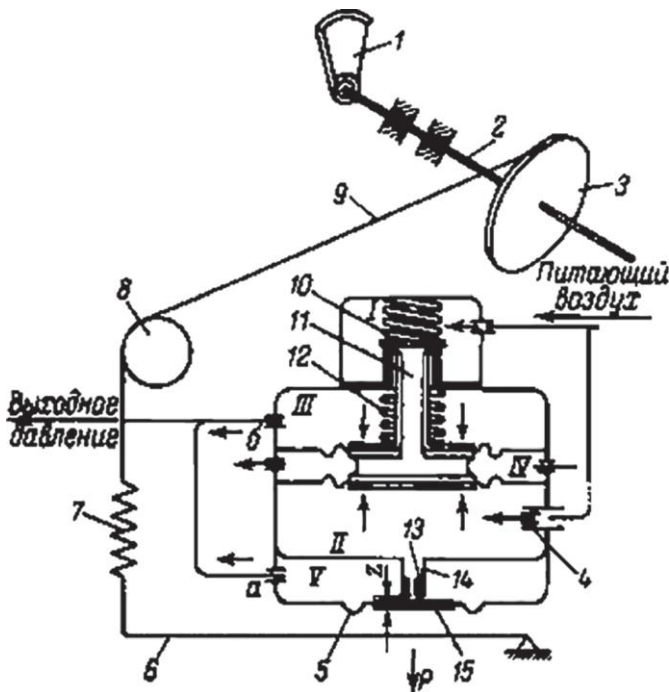


Рис. 2.6. Принципиальная схема преобразователя ПП

Одновременно выходное давление из камеры *III* передается в камеру *V*. Это давление, воздействуя на мембрану 5, с которой связана заслонка 15, уравнивает усилие *P*.

Линейность характеристики достигается тем, что мембранная система 13 поджата пружиной 12 всегда на одну и ту же величину, а так как перемещение тарельчатого клапана 10 очень мало, перепад давления на сопле 14 постоянен.

Класс точности преобразователя 1,0. Преобразователь обеспечивает передачу по пневмотрассе показаний на расстояние до 300 м.

В качестве вторичных приборов в пневматических системах можно применять любые измерители давления, а также



вторичные приборы, например системы «Старт». На рис. 2.7 показана кинематическая схема вторичного прибора системы «Старт» (ПВ2.2).

Действие приборов основано на компенсационном принципе измерения. Приборы используются для работы с пневматическими преобразователями или другими устройствами, выдающими унифицированные аналоговые сигналы 20–100 кПа (0,2–1 кгс/см<sup>2</sup>).

В измерительном узле входной пневматический сигнал  $P$  преобразуется в поступательное перемещение указателя (стрелки) и пера. Контролируемый параметр (входной пневматический сигнал  $P$ ) поступает в приемный сильфон 2. Воздух питания под давлением  $P_{nut}$  через дроссель 1 подается в силовой элемент 7 и к соплу 3. При изменении входного давления сильфон 2, дно которого упирается в рычаг 4, перемещает его, изменяя зазор между соплом и рычагом.

При перемещении рычага 4 вправо давление в силовом элементе 7 увеличивается, так как зазор между рычагом и соплом уменьшается. Это давление передается на рычаг 6 силового элемента, и ролик 9 поворачивается на угол, необходимый для достижения равновесия на рычаге 4 между усилиями от давления в сильфоне и пружины обратной связи 5. Углу поворота ролика соответствует пропорциональное перемещение стрелки (пера) 8. Шкала прибора стопроцентная линейная. Класс точности 1,0.

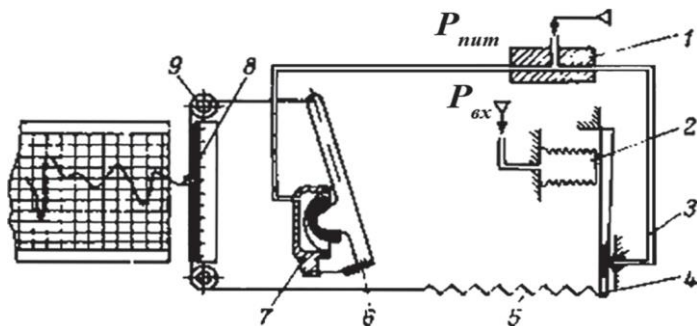


Рис. 2.7. Кинематическая схема вторичного прибора системы «Старт»

### **§ 2.3. Электропневматические и пневмоэлектрические измерительные преобразователи**

Для согласования электрической и пневматической ветвей ГСП выпускаются электропневматические и пневмоэлектрические преобразователи. Рассмотрим некоторые из них.

Преобразователь электропневматический (типа ЭПП) предназначен для преобразования непрерывного унифицированного электрического сигнала постоянного тока в непрерывный унифицированный пневматический сигнал. Работа преобразователя основана на принципе силовой компенсации.

Прибор состоит из двух функционально различных блоков: электромеханического преобразователя (совокупность магнитоэлектрического механизма и рычажной системы) и пневматического усилителя. Входной электрический сигнал подводится к катушкам электромагнита 7 (рис. 2.8). При этом в магнитопроводе возникает магнитный поток, вызывающий перемещение якоря 6. Усилие на якоре прямо пропорционально силе тока. Перемещение рычага 4 под действием этой силы вызывает изменение давления в линии сопла 3, установленного на основании 2. Это давление усиливается пневматическим усилителем (реле) 8 и по пневмолиниям передается на выход преобразователя и в сильфон обратной связи 5.

Усилие, возникающее в сильфоне под воздействием выходного давления, уравнивает через рычаг усилие на якоре от входного сигнала. Для сглаживания колебаний в линии сопла имеется пневмоемкость 1. Классы точности 0,5; 1,0.

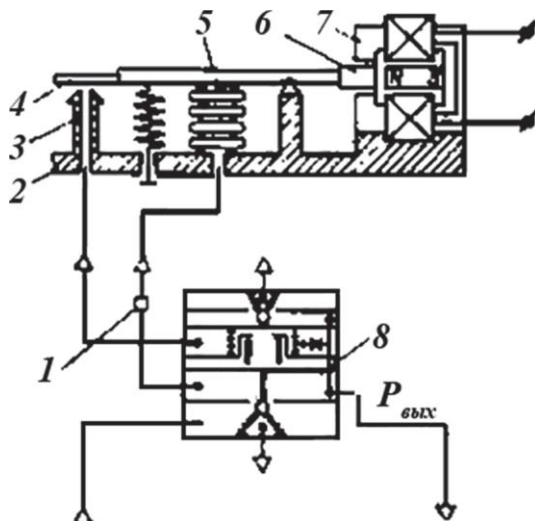


Рис. 2.8. Принципиальная схема электропневматического преобразователя

Преобразователь пневмоэлектрический (типа ПЭ-55М) предназначен для преобразования пневматического сигнала, поступающего от пневматического датчика или пневматического регулятора, в унифицированный электрический сигнал постоянного тока (рис. 2.9). Прибор состоит из магнитоэлектрического гальванометра, блока питания и манометрической трубки, установленных в общем корпусе.

Входной сигнал в виде давления, подлежащего измерению и преобразованию, попадая во внутреннюю полость манометрической трубки, деформирует ее. Конец трубки через спиральную пружину передает перемещение подвижной системы гальванометра (флажка), который находится в высокочастотном поле катушки, входящей в базовый контур генератора. При перемещении флажка изменяются параметры базового контура, что приводит к изменению режима генератора. При этом изменяется постоянная составляющая коллекторного тока, что приводит к изменению силы тока базы транзистора ПП и, следовательно, к изменению силы выходного тока.

## § 2.4. Средства измерений

[illegible]

К средствам измерений относят меры и измерительные приборы, измерительные преобразователи, а также измерительные установки, измерительные системы.

*Меры* представляют собой средства измерений, служащие для воспроизведения физической величины заданного размера. Мерами являются, например, гири, катушка сопротивления. К мерам относятся также стандартные образцы и образцовые вещества.

*Стандартный образец* — мера для воспроизведения единицы величины, характеризующей свойства или состав веществ и материалов. Например, стандартный образец ферромагнитных материалов с аттестованным содержанием химических элементов.

*Образцовое вещество* — мера, представляющая собой вещество с известными свойствами, воспроизводимыми при соблюдении условий приготовления, указанных в утвержденной спецификации. Например, чистые газы, чистые металлы, чистая вода. При помощи стандартных образцов и образцовых веществ осуществляют наладку и контроль технологических процессов.

*Измерительный прибор* — это средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для восприятия наблюдателем.

*Измерительная установка* — средство измерения, представляющее собой совокупность функционально объединенных измерительных приборов измерительных преобразователей и других вспомогательных устройств, расположенных в одном месте и связанных единством конструктивного исполнения.

Примером измерительной установки может служить рН-метр, состоящий из первичного преобразователя (комплекта электродов) вторичного прибора (потенциометра) и вспомогательного устройства (высокоомного усилителя).

Кроме рассмотренных средств измерений существуют измерительные системы, представляющие собой совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи и предназначенные для получения измерительной информации в форме, удобной для

автоматической обработки, передачи и использования в автоматизированных системах управления.

*Вторичное измерительное устройство* (вторичный прибор) — средство измерений, предназначенное для работы в комплекте с измерительными приборами, а также с некоторыми видами первичных и промежуточных преобразователей.

Измерительные приборы очень разнообразны и различаются принципом действия, конструкцией и др. Общим для всех измерительных приборов является наличие отсчетных устройств. По способу отсчета значений измеряемых величин приборы подразделяются на показывающие, т. е. допускающие только отсчитывание показаний, и регистрирующие, в которых предусмотрена регистрация показаний. К показывающим относят аналоговые и цифровые приборы.

Отсчетные устройства аналоговых приборов состоят из шкалы и указателя-стрелки; показания прибора являются непрерывной функцией измеряемой величины.

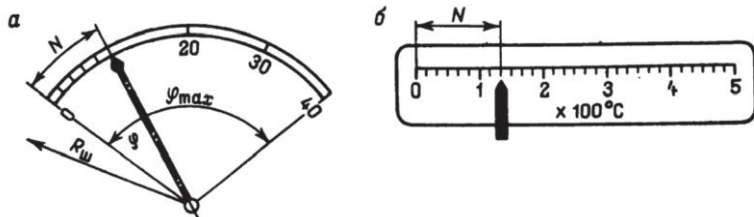


Рис. 2.10. Шкальные отсчетные устройства:

а — с дугообразной шкалой;

б — с горизонтальной шкалой

Цифровой измерительный прибор автоматически вырабатывает дискретные сигналы измерительной информации, показания прибора представлены в цифровой форме.

Приборы, в которых предусмотрена регистрация показаний в форме диаграммы, называют *самопишущими*.

При шкальном отсчете шкалы могут быть неподвижными и подвижными (шкала перемещается относительно

неподвижного указателя). Отметки на шкалах располагаются вдоль прямой линии или по дуге окружности на плоской или цилиндрической поверхности (рис. 2.10). На рис. 2.11 показаны наиболее типичные шкалы измерительных приборов.

Шкалы, нулевая отметка которых совпадает с началом или концом шкалы, называются *односторонними*. Шкала называется *двусторонней*, если нулевая отметка не совпадает с началом или концом шкалы (например, термометр расширения с пределом показаний от  $-50$  до  $+50$  °С).

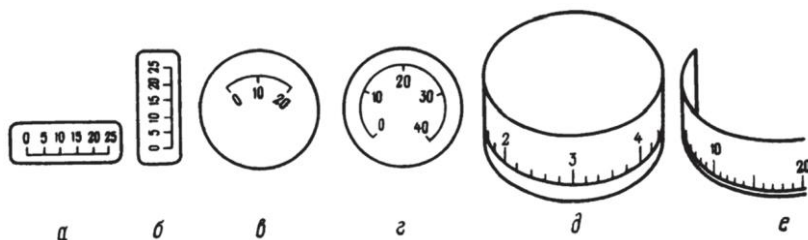


Рис.2.11. Шкалы:

*а — горизонтальная; б — вертикальная; в — дугообразная (с углом дуги до  $180^\circ$ ); г — дисковая круговая (с углом дуги более  $180^\circ$ ); д — вращающаяся цилиндрическая; е — профильная*

*Делением шкалы* называется промежуток между осями или центрами двух смежных отметок. Длины делений равномерных шкал — одинаковые; неравномерных шкал — неодинаковые.

Самопишущие (регистрирующие) приборы имеют приспособления для автоматической записи на бумажной ленте или диске текущего значения измеряемой величины во времени (рис. 2.12).

Ленточные диаграммы бывают двух типов: с прямолинейным движением пера прибора и с движением пера по дуге окружности. Дисковые диаграммы могут быть с равномерными и неравномерными делениями.

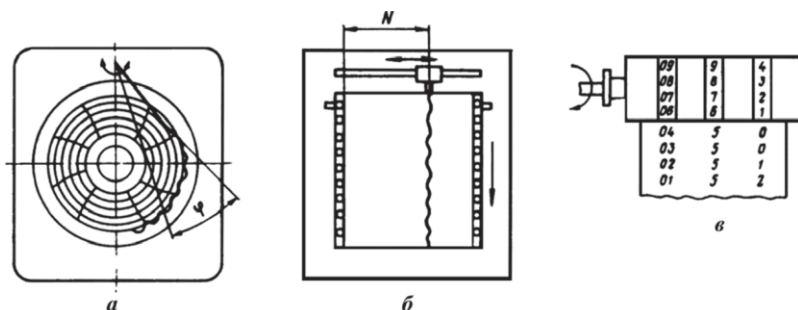


Рис.2.12. Регистрирующие устройства:  
 а — с записью в полярных координатах;  
 б — с записью в прямоугольных координатах;  
 в — с печатающим устройством

**Государственная система приборов.** Построение Государственной системы приборов (ГСП) основано на определенных системно-технических принципах, позволяющих наиболее рационально решить проблему обеспечения техническими средствами разнообразных систем контроля регулирования и управления технологическими процессами.

ГСП представляет собой совокупность нормализованных рядов унифицированных блоков, приборов и узлов, составленных из минимального числа блоков-модулей, на основе которых собирается любое устройство, входящее в ГСП. ГСП предусматривает преобразование измеряемых параметров (температуры, давления и т. п.) в единую форму информации, удобную для передачи на расстояние.

Устройства ГСП по роду используемой вспомогательной энергии носителя сигналов в канале связи, применяемой для приема и передачи информации и команд управления, делятся на электрические, пневматические и гидравлические. В ГСП входят также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии (приборы и регуляторы прямого действия).



Устройства, питающиеся при эксплуатации энергией одного рода, образуют единую структурную группу в Государственной системе приборов (ветвь ГСП). По функциональному признаку изделия ГСП разделяются на следующие группы устройств, предназначенные для: получения информации о состоянии процесса; приема, преобразования и передачи информации по каналам связи; преобразования, хранения и обработки информации и формирования команд управления; использования командной информации для воздействия на процесс и связи с оператором.

Для обеспечения информационного сопряжения между блоками, приборами и установками ГСП применяют унифицированные сигналы (УС). Унифицированный сигнал (УС) ГСП — сигнал дистанционной передачи информации с унифицированными параметрами.

В зависимости от вида унифицированных параметров в ГСП применяют УС четырех групп:

- 1) сигналы тока и напряжения электрические непрерывные;
- 2) сигналы частотные электрические непрерывные;
- 3) сигналы электрические кодированные;
- 4) пневматические сигналы.

## ТЕМА № 3

### Контроль давления

#### § 3.1. Общие сведения

**Давление** — один из важнейших параметров технологических процессов. За единицу измерения давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль (Па). Однако до настоящего времени используют также внесистемные единицы: Н/м<sup>2</sup>, мм. вод. ст. и бар. Эти единицы связаны следующими соотношениями:

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 98\,066,5 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па};$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

При измерении давления необходимо различать абсолютное, избыточное и атмосферное давление, а также вакуум.

Абсолютное давление  $P_a$  — параметр состояния вещества (жидкостей, газов и паров). Избыточное давление  $P_u$  — разность между абсолютным давлением  $P_a$  и атмосферным давлением  $P_{\bar{o}}$  (т. е. давлением окружающей среды).

$$P_u = P_a - P_{\bar{o}}, \quad (3.1)$$

Если абсолютное давление ниже атмосферного, то

$$P_{\bar{o}} = P_{\bar{o}} - P_a, \quad (3.2)$$

где  $P_a$  — давление (разрежение), измеряемое вакуумом.

По ГОСТ 2405–88 приборы для измерения давления классифицируются по принципу действия и по роду измеряемой величины.

По принципу действия приборы для измерения давления подразделяются на следующие:

- *жидкостные*, основанные на уравнивании измеряемого давления давлением соответствующего столба жидкости;

- *деформационные*, измеряющие давление по величине деформации различных упругих элементов или по развиваемой силе;
- *грузопоршневые*, в которых измеряемое давление уравнивается внешней силой, действующей на поршень;
- *электрические*, основанные или на преобразовании давления в одну из электрических величин, или на изменении электрических свойств материала под действием давления.

По роду измеряемой величины приборы для измерения давления делятся на:

- манометры — приборы для измерения абсолютного и избыточного давления;
- вакуумметры — приборы для измерения вакуума;
- мановакуумметры — приборы для измерения избыточного давления и вакуума;
- дифференциальные манометры — приборы для измерения разности двух давлений, ни одно из которых не является давлением окружающей среды;
- барометры — приборы для измерения давления атмосферного воздуха;
- напорометры (микроманометры) — приборы для измерения малых избыточных давлений;
- тягомеры (микроманометры) — приборы для измерения малых разрежений;
- тягонапорометры (микроманометры) — приборы для измерения малых давлений и разрежений.



*Рис. 3.1. Дифференциальный манометр с электрическим выходным сигналом, модель DPGT43*

Применяется для:

- отображения измеряемого давления;
- дистанционной передачи измерительной информации (выходные сигналы 4–20 мА, 0–20 мА, 0–10 В);
- измерения дифференциального давления с возможными перегрузками.

*Особенности устройства DPGT43:*

- система Plug and play позволяет избежать настройки и конфигурирования прибора;
- характеристика сигнала соответствует стандарту NAMUR;
- диапазон измерений 0–16 мбар;
- удобный для отображения и чтения циферблат, номинальный размер 100 и 160 мм, отображаемость по месту снятия показания;
- не требует дополнительного питания;
- безопасное исполнение.

*Описание прибора*

Модель DPGT43 intelliGAUGE (американский патент № 8030990) применяется там, где необходимо сочетание местного отображения дифференциального давления и передачи измерительной информации в систему управления.

Комбинация высококачественного измерительного механизма и точного преобразования и обработки электронного сигнала позволяет продолжать измерения даже в случае перебоя в электропитании. Нет необходимости в дополнительной точке отбора давления для монтажа отдельного показывающего прибора.

Модель DPGT43 выполнена на базе высококачественного дифманометра 732.51 из нержавеющей стали с номинальными размерами

100 мм и 160 мм. Данный манометр производится по EN 837-3 из хромоникелевой стали с высокой коррозионной стойкостью.

Измерительная камера полностью металлическая, без полимерных уплотнений, что гарантирует более длительную герметичность и отсутствие утечек. Высокая стойкость к перегрузкам также обеспечивается цельнометаллической конструкцией измерительной ячейки и ее компактностью.

Под воздействием давления деформация специальной профильной мембраны передается на стрелку и вызывает ее угловое перемещение, пропорциональное значению давления. Электронный сенсор, испытанный в экстремальных применениях автоматике, определяет положение оси и таким образом преобразует значение давления в пропорциональный выходной электрический сигнал, например 4–20 мА. Данный сенсор является бесконтактным, а значит, он не подвержен трению и не изнашивается.

Электронный преобразователь, встроенный в механический манометр, сочетает преимущества электрической передачи измерительной информации с надежностью местного отображения. Диапазон измерений механической шкалы автоматически связан с диапазоном выходного сигнала 4–20 мА. Нулевое значение выходного сигнала может быть настроено вручную.

### **§ 3.2. Жидкостные манометры**

Жидкостные манометры отличаются простотой конструкции и сравнительно высокой точностью измерения. Их широко применяют как в качестве переносных (лабораторных), так и технических приборов для измерения давления.

Переносный U-образный манометр, представляющий собой согнутую в виде буквы П стеклянную трубку 1, показан на рис. 3.2. Трубка закреплена на доске 2 со шкалой 3, расположенной между коленами трубки, и заполнена жидкостью (спиртом, водой, ртутью). Один конец трубки соединен с полостью, в которой измеряется давление, другой конец трубки сообщается с атмосферой. Под действием измеряемого давления жидкость в трубке перемещается из одного колена в другое до тех пор, пока измеряемое давление не уравнивается гидростатическим давлением столба

жидкости в открытом колене. Если давление в полости, с которой соединен прибор, ниже атмосферного, то жидкость в коленях переместится в обратном направлении и высота ее столба будет соответствовать вакууму.

Присоединив оба колена трубки к полостям с различными давлениями  $P_1$  и  $P_2$ , можно определить разность давлений.

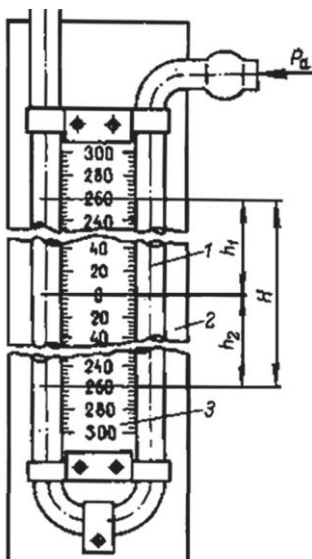


Рис. 3.2. U-образный манометр (пояснения в тексте)

Манометр заполняют жидкостью до нулевой отметки шкалы. Для определения высоты столба жидкости необходимо сделать два отсчета (снижения в одном колене и подъема в другом) и суммировать их величины, т. е.  $H = h_1 - h_2$ .

Промышленные манометры MVI и MVL из нержавеющей стали содержат вертикальный столб жидкости, предназначенный для точного измерения отрицательных или очень низких положительных давлений и перепада давления (DP) воздуха или нейтрального газа.

Они используются во всех отраслях промышленности и особенно рекомендуются в областях услуг качества, метрологии и калибровки.



Рис. 3.3. Промышленные  
жидкостные манометры Kimo  
улучшенной точности  
из нержавеющей стали

Манометры серий MVI и MVL отличаются качеством и точностью столбцов из жидкого стекла. Приборы серии MVI оснащены жаростойким стеклом трубки (Pyrex), а серии MVL — калиброванным боросиликатным стеклом трубки высокой точности.

*Внешний вид манометров:*

- черные цифры на белом фоне;
- линейка: ползунок, настройка нулевой точки, 30 мм хода;
- бегунок памяти предыдущего значения: установка на всем пути вверх по шкале.

*Столбцы жидкостные:*

- Pyrex стеклянная трубка, внутренний диаметр  $4 + 0,7$  мм (MVI серии).
- стеклянная трубка калиброванная, внутренний диаметр  $4 + 0,015$  мм (MVL серии).

*Погрешность при 20–22 °C:*

- стеклянная трубка Pyrex в приборах серии MVI:  $+1$  % от показаний;
- калиброванная стеклянная трубка в приборах серии MVL:  $+0,3$  %.

*Корпус:* из нержавеющей стали 316L.

*Соединение:*  $\frac{1}{4}$  BSP (внешнее) из нержавеющей стали.

Предназначены для настенного монтажа.

*Рабочая температура:* от  $-20$  до  $+70$  °C в зависимости от используемой жидкости.

Устройство может выдерживать статическое давление до 40 бар в зависимости от длины трубки.

Для регулировки фотозлектрического обнаружителя вручную используются красный и зеленый индикаторы с точностью до 0,3 мм.

В приборе есть небольшой дисплей для просмотра значения.

*Точность:*

- в диапазоне между 0 до 3000 Па: 0,2 % от показаний ( $\pm 1$  Па);
- в диапазоне между 3000 и 20000 Па:  $\pm 0,5$  % от показаний ( $\pm 2$  Па).

**Чашечный манометр**, являющийся разновидностью П-образного, показан на рис. 3.4. Одно из колен чашечного манометра выполнено в виде сосуда (чашки) 1, диаметр которого больше диаметра трубки 2, представляющей собой другое колено. Полость с измеряемым давлением (больше атмосферного) соединяется с чашечкой, а трубка соединяется с атмосферой. Так как площадь сечения чашки больше площади сечения трубки, жидкость под действием давления в чашке опускается на высоту, которая меньше высоты подъема в трубке. Обычно площадь сечения чашки значительно больше сечения трубки, поэтому величиной понижения уровня жидкости в чашке пренебрегают и результат отсчитывают только по высоте столбца жидкости в трубке от начального значения. Однако при этом возникает погрешность, вызванная понижением уровня жидкости в чашке, что изменяет положение нуля шкалы. Например, при диаметре чашки, в десять раз большем диаметра трубки, получим

$$h_2 = 0,01 h_1, \quad (3.3)$$

т. е. относительная погрешность составит 1 %. Таким образом, погрешность прибора зависит от отношения площадей сечений трубки и чашки и может быть сколь угодно малой. На практике площади сечений чашки 5 и трубки 5 выбирают обычно такими, чтобы отношением 5/5 можно было пренебречь. В основном для чашечных приборов  $s/S \leq 1/400$ .

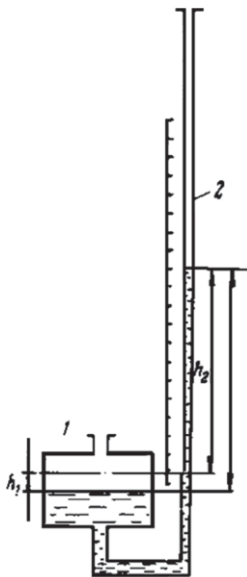


Рис. 3.4. Чашечный (однотрубный) манометр



**Микроманометр с наклонной трубкой.** При измерении малых давлений и разрежений порядка миллиметров или десятков миллиметров столба жидкости ошибка отсчета становится весьма значительной. Например, при высоте столба жидкости, равного 10 мм, ошибка отсчета 0,5 мм дает погрешность измерения, равную 5 % измеряемой величины. Поэтому при измерении малых давлений приходится применять приборы, обеспечивающие бóльшую точность измерения, чем U-образные или чашечные манометры.

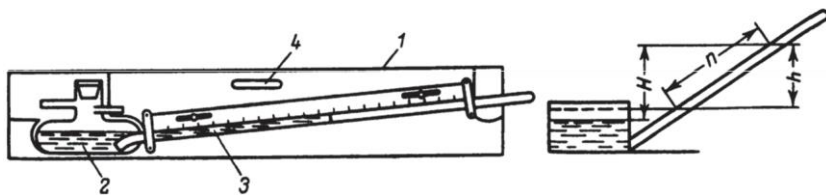
Одним из наиболее распространенных приборов этого типа является манометр с наклонной трубкой (рис. 3.5). Прибор состоит из стеклянного сосуда 2, к которому припаяна стеклянная трубка 3, наклоненная под некоторым углом к горизонту.

Сосуд с трубкой укреплен на деревянной доске со шкалой, градуированной в миллиметрах водяного столба. Для удобства шкала сделана подвижной, чтобы при заполнении прибора жидкостью можно было совместить нуль шкалы с мениском жидкости в трубке. При измерении давления ниже атмосферного (разрежения) к пространству присоединяют конец трубки 3. Для точной установки в горизонтальной плоскости прибор снабжен уровнем 4. Поскольку трубка 3 наклонена, высота столба жидкости, уравновешивающая измеряемое давление, будет равна:

$$h = n \sin \alpha, \quad (3.4)$$

где  $n$  — перемещение мениска жидкости в трубке, отсчитанное по шкале.

Таким образом, цена деления шкалы в  $1/\sin \alpha$  раз больше высоты столба жидкости. Изменение уровня жидкости в сосуде 2 при подъеме жидкости в трубке учитывается при градуировке шкалы и поэтому не вносит ошибки в измерение. Микроманометры с наклонной трубкой изготавливают обычно для измерения давления в интервале 1,57–980 Па.



*Рис. 3.5. Микроманометр с наклонной трубкой*

### § 3.3. Деформационные приборы

В промышленной практике измерения давления и разности давлений широкое применение получили деформационные (с упругим чувствительным элементом) приборы. В этих приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе, которые преобразуются передаточными механизмами в угловое или линейное перемещение указателя по шкале прибора. В качестве упругих элементов используют трубчатые пружины, мембраны, мембранные коробки и сильфоны.

По виду упругого чувствительного элемента пружинные приборы делятся на следующие группы:

- 1) приборы с трубчатой пружиной (рис. 3.6, *а* и *б*);
- 2) мембранные приборы, упругим элементом которых служит мембрана (рис. 3.6, *в*), мембранная коробка (рис. 3.6, *г* и *д*), блок мембранных коробок (рис. 3.4, *е* и *ж*);
- 3) пружинно-мембранные с гибкой мембраной (рис. 3.6, *з*);
- 4) приборы с упругой гармониковой мембраной (сильфоном) (рис. 3.6, *к*);
- 5) пружинно-сильфонные (рис. 3.6, *и*).

Приборы с чувствительными элементами в виде гофрированных мембран, мембранных коробок и мембранных блоков применяют для измерения небольших избыточных давлений и разрежений (манометры, напоромеры и тягомеры), а также перепадов давления (дифференциальные манометры).

Зависимость прогиба мембраны от измеряемого давления в общем случае нелинейна. Число, форма и размеры гофра зависят от назначения прибора, пределов измерения и других факторов.

Чтобы увеличить прогиб в приборах для малых давлений, мембраны попарно соединяют в мембранные коробки, а коробки — в мембранные блоки. Мембранные коробки могут быть *анероидными* (рис. 3.6, *з*) и *манометрическими* (рис. 3.6, *д*). Анероидные коробки, применяемые в барометрах, герметизированы и заполнены воздухом или инертным газом при давлении 1 Па. Деформация анероидной коробки происходит под воздействием разности давления окружающей ее среды и давления в полости коробки. Так как давление в полости коробки очень мало, можно считать, что ее деформация определяется атмосферным давлением.

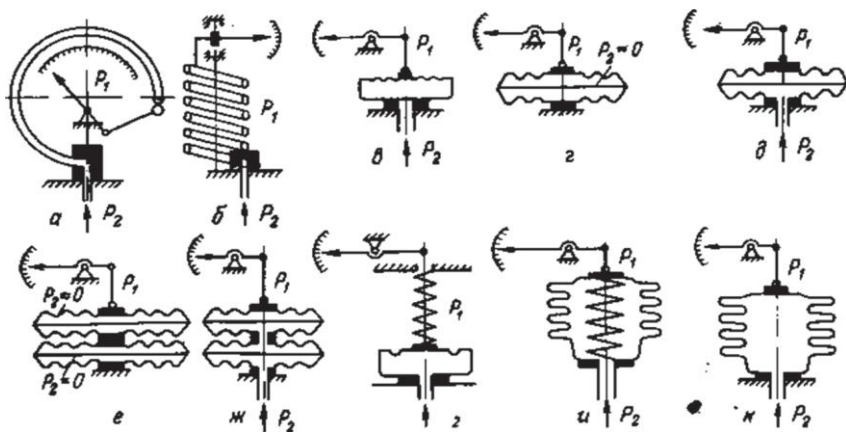
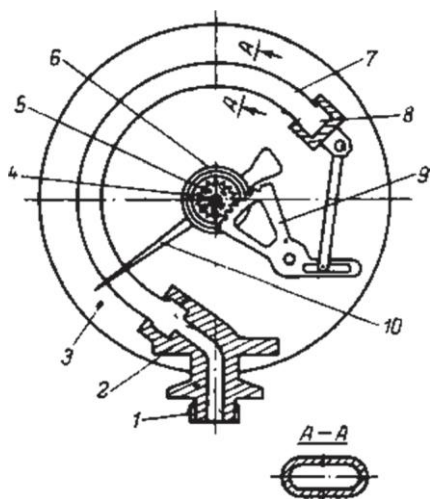


Рис. 3.6. Типы пружинных манометров

Деформация анероидной или манометрической коробки равна сумме деформаций составляющих ее мембран. Третий вид упругих элементов манометров составляют особые гофрированные коробки, называемые *сильфонами*. Сильфон

представляет собой цилиндрический тонкостенный сосуд, на боковой поверхности которого выдавлены глубокие параллельные волны (рис. 3.6, к). При воздействии осевой нагрузки, внешнего или внутреннего давления длина сильфона изменяется, увеличиваясь или уменьшаясь в зависимости от направления приложенной силы.



*Рис. 3.7. Принципиальная схема манометра с трубчатой пружиной (пояснения в тексте)*

**Манометр с трубчатой пружиной** (рис. 3.7) — один из наиболее распространенных видов деформационных приборов

Чувствительным элементом такого прибора является согнутая по дуге круга и запаянная с одного конца трубка 7 эллиптического или овального сечения. Открытым концом трубки 7 через держатель 2 и ниппель 1 присоединяют к источнику измеряемого давления. Свободный (запаянный) конец 8 трубки 7 через передаточный механизм

соединен с осью 4 стрелки 10, перемещающейся по шкале манометра.

Трубки манометров, рассчитанных на давление до 500 кПа (50 кгс/см<sup>2</sup>), изготавливают из меди, а трубки манометров, рассчитанных на большее давление, — из стали.

Свойство изогнутой трубки некруглого сечения изменять величину изгиба при изменении давления обусловлено изменением формы сечения. Под действием давления внутри трубки эллиптическое или овальное сечение, деформируясь,

приближается к круговому, что приводит к раскручиванию трубки, т. е. к угловому перемещению ее свободного конца. Это перемещение в определенных пределах пропорционально измеряемому давлению. Поэтому максимальное рабочее давление манометра должно быть ниже предела пропорциональности с некоторым запасом прочности.

В соответствии с этим шкалу манометра (верхний предел измерения) выбирают таким образом, чтобы рабочий предел измерения (наибольшее рабочее давление) был не менее  $\frac{3}{4}$  верхнего предела измерения при постоянном давлении и не менее  $\frac{2}{3}$  верхнего предела измерения при переменном давлении.

Верхние пределы измерения манометра выбирают из ряда:  $(1; 1,6; 2,5; 4; 6) \cdot 10^n$  где  $n$  — любое целое положительное или отрицательное число.

Перемещение свободного конца трубки под действием давления весьма невелико, поэтому в конструкцию прибора введен передаточный механизм, увеличивающий масштаб перемещения конца трубки.

Зубчато-секторный передаточный механизм показан на рис. 3.7. Он состоит из зубчатого сектора 9, шестерни 5, сцепляющейся с сектором, и спиральной пружины 6. На оси шестерни 5 закреплена указывающая стрелка 10 манометра. Пружина 6 одним концом прикреплена к оси шестерни, а другим — к неподвижной точке платы 3 механизма. Пружина, выбирая зазоры в зубчатом зацеплении и шарнирных соединениях передаточного механизма, исключает люфт стрелки.

**Манометр с трубкой Бурдона** применяется в неблагоприятных эксплуатационных условиях, при пульсации и вибрации, для исследования газообразных и жидких сред, не агрессивных к медным сплавам, в гидравлике, компрессорах и судостроении.



*Рис. 3.8. Манометр  
с трубкой Бурдона 213.53.063 0-8 bar g1/4b  
с гидрозаполнением WIKA*

*Особенности манометра:*

- виброустойчивость и ударопрочность;
- высокопрочная конструкция;
- номинальный размер 63, 100 одобрен немецкой ассоциацией Lloyd и Росстандартом;
- диапазон измерений 0–1000 бар.

*Описание прибора:*

- исполнение EN 837-1;
- номинальный размер 50, 63, 100 мм;
- класс точности:
  - при номинальных размерах 50, 63: 1,6;
  - при номинальном размере 100: 1,0.

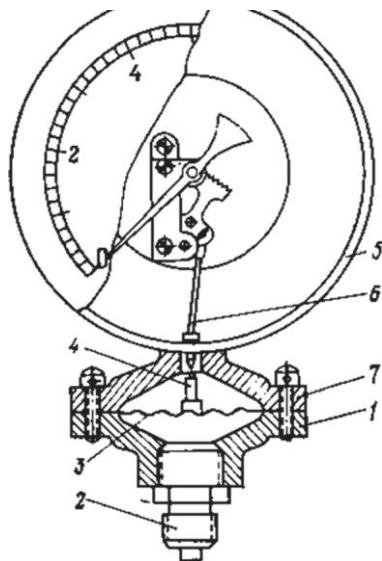
*Диапазоны шкалы:*

- номинальный размер 50: от 0–1 до 0–400 бар
- номинальный размер 63, 100: от 0–0,6 до 0–1000 бар, а также соответствующие вакуумметрические и мановакуумметрические диапазоны.

*Рабочая температура:*

- окружающая среда: от –20 до +60 °С;
- измеряемая среда: до +60 °С.

**Мембранный манометр** (рис. 3.9). Упругим элементом манометра является гофрированная мембрана 3, края которой зажаты между фланцами чашек 1 и 7. Чашка имеет ниппель 2, которым манометр присоединяют к измеряемому давлению. Верхняя чашка 7 представляет собой одно целое с корпусом манометра 5. В центре мембраны 3 закреплена стойка 4, шарнирно соединенная с поводком 6. Последний соединен



с сектором зубчато-секторного передаточного механизма.

Наиболее удобны мембранные манометры для измерения давления вязких жидкостей или химически агрессивных сред.

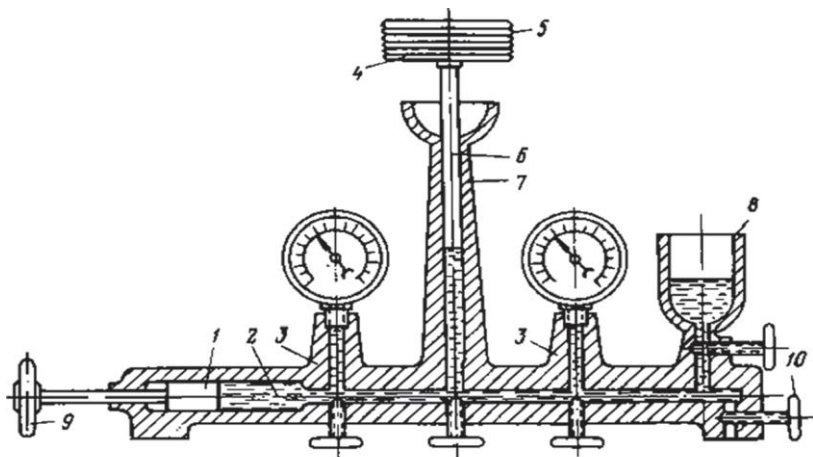
*Рис. 3.9. Мембранный манометр*

### § 3.4. Грузопоршневой манометр

Принцип действия поршневого манометра основан на уравнивании сил, создаваемых, с одной стороны, измеряемым давлением, а с другой стороны — грузами, действующими на поршень, помещенный в цилиндр (рис. 3.10).

Прибор состоит из колонки 7 с цилиндрическим шлифованным каналом и поршня 6, несущего на своем верхнем конце тарелку 4 для нагружения ее эталонными грузами 5. Поршень винтового пресса служит для подъема и опускания поршня 6 так, чтобы при любых нагрузках поршень 6 был погружен в цилиндр примерно на  $\frac{2}{3}$  своей высоты. Камеру 2 поршневого манометра заполняют трансформаторным, вазелиновым или касторовым маслом через воронку 8. Давление в системе создают с помощью винта с маховиком 9 и поршня. Штуцеры 3 служат для установки поверяемого и образцового манометров. Вентиль 10 предназначен для слива масла.

В процессе измерений для устранения вредных сил трения поршня *б* о стенки цилиндрического канала колонки *7* поршень *б* вручную приводят во вращение. Поршневой манометр может быть использован для поверки манометров как с помощью грузов, так и с помощью образцового манометра.



*Рис. 3.10. Поршневой манометр*



*Рис. 3.11. Манометр грузопоршневой МП-60 класса точности 0,05*

Манометр избыточного давления грузопоршневой МП-60 класса точности 0,05 (рис. 3.11) предназначен для поверки и калибровки измерительных приборов давления (деформационных манометров, датчиков, регистраторов и т. д.), а также для непосредственного измерения избыточного давления в подключенных замкнутых объемах. Технические характеристики манометра соответствуют ГОСТ 8291-83.

Грузопоршневой манометр является наиболее точным и стабильным прибором давления, дающим наилучшую повторяемость результатов измерений.



### § 3.5. Электрические манометры

Тензорезисторные измерительные преобразователи ИП «Сапфир» обеспечивают непрерывное преобразование давления в унифицированный электрический токовый сигнал дистанционной передачи. Действие прибора основано на использовании тензометрического эффекта в полупроводниковом материале.

Воздействие измеряемого параметра, преобразованное в усилие, вызывает изменение напряженного состояния тензорезисторов, жестко соединенных (нанесенных в виде монокристаллической пленки) с чувствительным элементом тензомодуля, который размещен внутри измерительного блока первичного преобразователя. Изменение сопротивления тензорезисторов, пропорциональное изменению величины измеряемого параметра, преобразуется встроенным электронным устройством в токовый выходной сигнал (4–20 мА) первичного преобразователя.

Сигнал 4–20 мА передается по искробезопасной двухпроводной линии дистанционной передачи к блоку питания БПЗ-24 (по этим же проводам подается питание), где преобразуется в унифицированный токовый выходной сигнал (0–5; 0–20 или 4–20 мА) в зависимости от исполнения прибора.

ИП «Сапфир» состоит из двух конструктивных блоков: первичного преобразователя и блока питания типа БПЗ-24, связанных двухпроводной линией связи. Первичные преобразователи включают измерительный блок, встроенное унифицированное электронное устройство и различаются лишь конструкцией измерительных блоков.

Измерительные блоки выполнены на основе тензомодулей двух типов (в зависимости от пределов измерения): рычажно-мембранного и мембранного. Схема измерительного блока разности давлений с тензомодулем рычажно-мембранного типа показана на рис. 3.12.

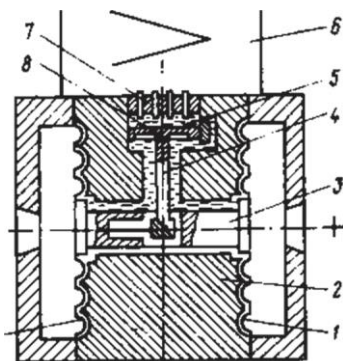


Рис. 3.12. Измерительный блок разности давлений

Тензомодуль рычажно-мембранного типа 4 размещен внутри основания 2 в заполненной полиметилсилоксановой жидкостью замкнутой полости и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 1. Мембраны по наружному контуру приварены к основанию и соединены между собой центральным щитком 3, который связан с концом рычага тензомодуля. Разность давлений вызывает прогиб мембран 1 и 8

тензомодуля, а также изменение сопротивления тензорезисторов 5. Электрический сигнал с тензомодуля передается из полости высокого давления во встроенное электронное устройство 6 по проводам через герметичный вывод 7.

При односторонней перегрузке рабочим давлением мембрана 1 после дополнительного перемещения ляжет на профилированную подушку, поэтому измерительный блок выдерживает эту перегрузку, не разрушаясь.

В преобразователях избыточного давления, разрежения и избыточного давления — разрежения используются одни и те же измерительные блоки, которые отличаются от измерительных блоков преобразователей разности давлений конструкцией фланцев.

Промышленность выпускает следующие типы ИП «Сапфир»: 651 ДИ и 652 Ди для избыточного давления; 651 ДА и 652 ДА — для абсолютного давления; 651 ДВ — для разрежения; 651 ДД и 652 ДД — для разности давления, 651 ДГ — для гидростатического давления.

Для измерения давления неагрессивных жидких и газообразных сред и сигнализации при его отклонении от заданного интервала используют приборы типа МП4-III. Прибор

состоит из четырех основных узлов (рис. 3.13): узла измерения величины давления, трибко-секторного механизма, контактного устройства, сигнального блока. Перемещение свободного конца манометрической пружины 1 через тягу 9, сектор 10 и трибку 2 преобразуется в поворот показывающей стрелки 6 относительно шкалы 4. Вместе с показывающей стрелкой поворачивается ведущий поводок 7, который перемещает подвижные контактные поводки 5.

Сигнальный блок питается от сети переменного тока через однополупериодный выпрямитель  $D_1$  и стабилизатор  $D_2$ . Нагрузкой предельных контактов 3 и 8 являются электромагнитные реле  $P_1$  и  $P_2$ , служащие для коммутации внешних цепей. Когда величина измеряемого параметра находится в пределах, заданных сигнальными указателями, контакты поводкового контактного устройства разомкнуты: нормально замкнутые контакты реле  $P_1$  и  $P_2$  замыкают цепь выдачи сигнала «Норма». При выходе величины измеряемого параметра за пределы, установленные сигнальными указателями, замыкаются соответствующие контакты поводкового контактного устройства, нормально разомкнутые контактные реле  $P_1$  и  $P_2$  замыкают цепь выдачи сигнала «Минимум» или «Максимум».

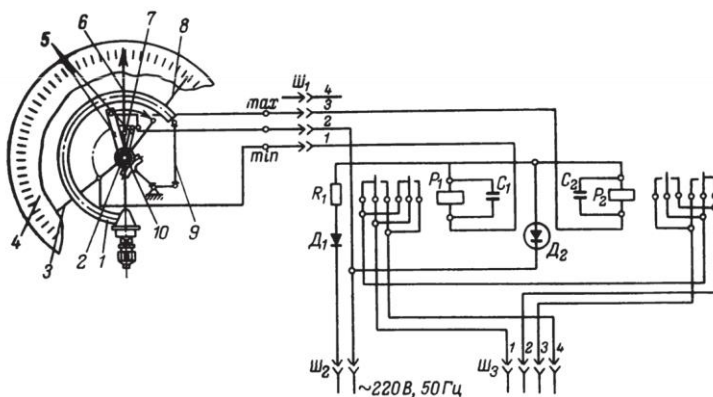


Рис. 3.13. Принципиальная схема прибора типа МП 4-III

На рис. 3.14 показана принципиальная схема сильфонного электрического взрывозащищенного манометра типов МС-Э1-В4 и МС-Э2-В4.

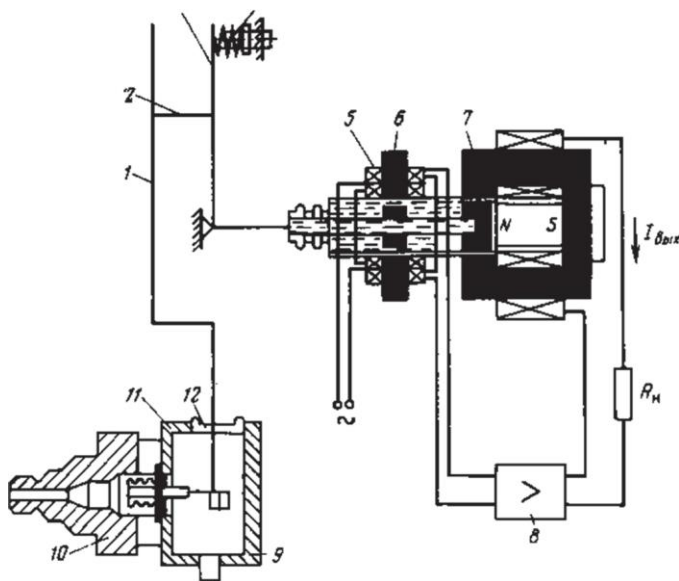


Рис. 3.14. Принципиальная схема сильфонного взрывозащищенного электрического манометра:

- 1, 3 — рычаги; 2 — лента; 4 — пружинный корректор нуля;
- 5 — плунжер; 6 — индикатор рассогласования;
- 7 — электромагнитный механизм силовой обратной связи;
- 8 — электронный усилитель;
- 9 — сильфонный чувствительный элемент;
- 10 — штуцер для подвода измеряемого давления;
- 11 — корпус измерительного блока;
- 12 — мембранный вывод измеряемого усилия из полости измерительного блока

Манометр предназначен для непрерывного преобразования давления жидких и газообразных сред, в том числе азотоводородных и аммиачных, в пропорциональный унифицированный электрический выходной сигнал постоянного тока.

Преобразователи имеют взрывонепроницаемое исполнение (ВЧатЗ) и могут применяться во взрывоопасных помещениях и на взрывоопасных установках всех классов, где возможно образование взрывоопасных смесей категорий 1, 2, 3 и подкатегорий 4а групп Т1, Т2, Т3.

Принцип действия преобразователей — силовая компенсация. Начальное (нулевое) значение токового выходного сигнала устанавливается пружинным корректором нуля 4.

Интервал измерения настраивают изменением передаточного отношения рычажного механизма, для этого перемещают ленту 2, передающую усилие с рычага 1 на рычаг 3.

Настройка нулевого значения выходного сигнала и диапазона измерения может производиться во взрывоопасном помещении без отключения электрического питания.

### **§ 3.6. Пневматические манометры**

На рис. 3.15 показана принципиальная схема сильфонного манометра абсолютного давления типа МАС-П. Манометр абсолютного давления сильфонный пневматический МАС-П предназначен для непрерывного преобразования абсолютного давления газа в пропорциональный пневматический сигнал дистанционной передачи. Выпускается двух типоразмеров (МАС-П1 и МАС-П2) на одиннадцать различных пределов измерения.

Датчик дифманометра ДС-П состоит из блока сдвоенных сильфонов 12 (рис. 3.16), полости которых заполнены кремнийорганической жидкостью. Полости сильфонов сообщаются между собой каналом, который перекрывается клапаном 11 при увеличении деформации сильфонов выше предельной рабочей деформации. При нарушении герметичности мембраны 9 одновременно закрываются оба клапана сильфонных чувствительных элементов, обеспечивая надежную защиту от выброса наружу измеряемой среды

в случае разрушения сильфонов, что особенно важно при измерениях перепада давления токсичных и взрывоопасных сред.

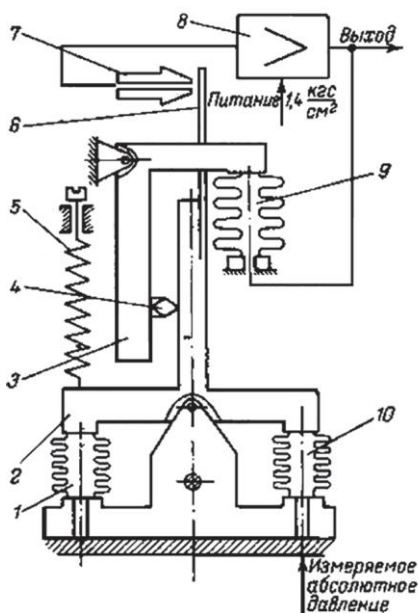


Рис. 3.15. Принципиальная схема манометра МАС-П:

- 1, 9, 10 — сильфоны;  
2, 3 — рычаги; 4 — наездник;  
5 — пружина;  
6, 7 — сопло-заслонка;  
8 — усилитель

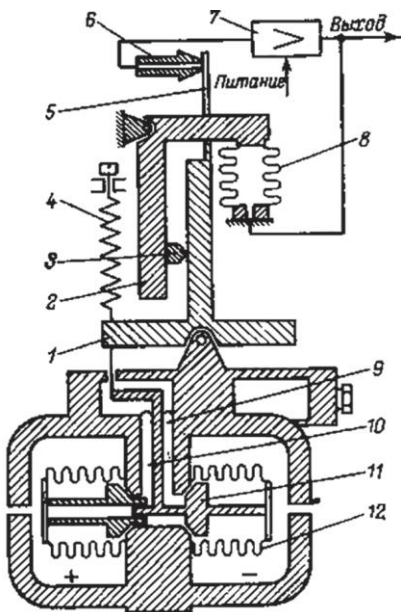


Рис. 3.16. Принципиальная схема дифманометра ДС-П:

- 1, 2, 10 — рычаги; 3 — наездник;  
4 — пружина; 5 — заслонка;  
6 — сопло; 7 — усилитель;  
8, 12 — сильфоны; 9 — мембрана;  
11 — клапан

На рис. 3.17 показана принципиальная схема пружинного манометра типа МП4-У с пневматической передачей показаний на расстояние. Принцип действия измерительной части прибора основан на уравнивании величины измеряемого давления силой упругой деформации одновитковой трубчатой пружины, а принцип действия пневматической части — на компенсации сил.

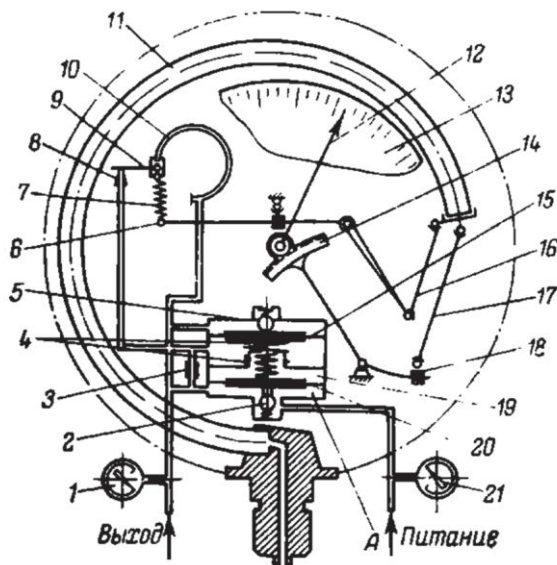


Рис. 3.17. Принципиальная схема манометра МП4-У

Изменение давления, передаваемого во внутреннюю полость трубчатой пружины 11, вызывает перемещение ее свободного конца, которое преобразуется передаточно-множительным механизмом (тяги 17, рычага 18 и трибно-секторной пары 14) в движение стрелки 12 относительно шкалы 13. Одновременно перемещение конца манометрической пружины передается на заслонку 9 пневмопреобразователя через тягу 16, рычажный механизм 6 и цилиндрическую пружину 7. Заслонка может перемещаться относительно сопла 8.

Пневмопреобразователь работает следующим образом. Питающий воздух под давлением  $140 \pm 14$  кПа, которое контролируется манометром 21, поступает через входное отверстие в усилительное пневмореле 19, где редуцируется шариковым клапаном напора давления 2 до 3–4 кПа и через камеру давления командного воздуха А, а также дроссель 3 поступает в линию сопла 8. При полном открытии сопла 8

заслонкой 9 избыточное давление в линии перед соплом равно нулю, так как отверстие сопла значительно больше отверстия дросселя, а давление командного воздуха определяется силами пружин 4 и составляет 4 кПа. Увеличение давления в линии перед соплом 8 при закрывании его передается на мембрану 15, и шариковый клапан сброса 5 открывает отверстие для выпуска воздуха в атмосферу, а мембрана 20, воздействуя на шариковый клапан напора давления 2, открывает входное отверстие питания. При этом в камере давления командного воздуха давление возрастает на величину повышения давления в линии перед соплом; это давление передается во внутреннюю полость трубчатой пружины обратной связи 10 и на выход прибора. Давление воздуха контролируется по манометру 7.

Под действием давления, передаваемого во внутреннюю полость трубчатой пружины обратной связи 10, пружина деформируется, отводит заслонку 9 от сопла на расстояние, обеспечивающее поддержание в системе давления воздуха, пропорционального измеряемому параметру. Как только заслонка останавливается, увеличение давления в камере давления командного воздуха прекращается, на дросселе 3 устанавливается прежний перепад давления, а вся система уравнивается.

При уменьшении измеряемого прибором давления среды заслонка 9 отходит от сопла 8, что приводит к уменьшению давления в линии перед соплом, а следовательно, и в камере командного воздуха, так как мембраны 15 и 20 перемещаются так, что открывается клапан сброса давления 5 и перекрывается клапан напора 2. Сброс давления будет продолжаться до прекращения движения заслонки, т. е. до установления нового равновесия сил на мембранах. Уменьшенное давление в камере давления командного воздуха 4 будет передано на выход прибора и во внутреннюю полость пружины обратной



связи  $10$ , которая, деформируясь, приблизит заслонку к соплу на расстояние, обеспечивающее поддержание в системе давления, пропорционального измеряемой величине.

Приборы выпускаются с классами точности 1,0 и 1,5. Интервал изменения выходного сигнала 20–100 кПа (0,2–1,0 кгс/см<sup>2</sup>).

### **§ 3.7. Выбор, установка и защита от коррозии средств измерения давления**

Широкий диапазон измерений давления и различные специфические условия, в которых они производятся на химических заводах, не позволяют дать исчерпывающие указания по установке и эксплуатации манометров в производственных условиях. Однако из многообразия требований, предъявляемых к измерениям, можно выделить некоторые общие, выполнение которых позволит правильно измерять давление и вакуум в любых условиях.

Прежде всего необходимо узнать примерную величину давления, пределы его колебаний, если оно переменное или пульсирующее, а также физико-механические свойства среды. Прибор должен быть выбран с учетом требуемой точности измерения, причем необходимо учитывать ту погрешность, которую дает прибор в условиях эксплуатации под влиянием неблагоприятных внешних факторов (повышенной температуры, вибраций и т. п.). Так как допустимая погрешность прибора, определяющая его класс, выражается в процентах предельного значения шкалы, желательно выбирать такой прибор, пределы шкалы которого заданы как можно ближе к измеряемому давлению, тогда относительная погрешность будет наименьшей.

Для стабильного или плавно изменяющегося давления допустимое рабочее давление должно находиться в пределах  $\frac{1}{2}$  —  $\frac{2}{3}$  шкалы прибора, а для колеблющегося давления

$\frac{1}{3}$  —  $\frac{1}{2}$  шкалы. Для других приборов (не пружинных) допустимое рабочее давление должно быть возможно ближе к предельному значению шкалы прибора.

Кроме указанных факторов, определяющих выбор прибора, необходимо учитывать измеряемую среду, что весьма важно в условиях химических заводов, где почти всегда приходится иметь дело с агрессивными жидкостями и газами. В химической промышленности манометры часто устанавливают на теплообменниках, выпарных, экстракционных и дистилляционных аппаратах, автоклавах, сушилках и т. п. В таких случаях необходима защита воспринимающей части манометра (пружины, мембраны) от воздействия газа или пара с высокой температурой. Для этого перед манометром устанавливают так называемую сифонную трубку в виде буквы V или кольцевой петли. При измерении давления горячего газа сифонную трубку заполняют водой. Температура жидкости, заполняющей трубку, вследствие большой теплопотери в окружающую среду и малой теплопроводности близка к температуре окружающего воздуха, поэтому воспринимающая часть прибора предохраняется от нагревания.

Если жидкость, газ, пар или его конденсат химически активны по отношению к материалу воспринимающей части прибора, то вместо сифонной трубки перед манометром устанавливают мембрану или защитный сосуд, заполненный до половины инертной жидкостью (рис. 3.18).

Такой жидкостью могут служить глицерин, вазелиновое масло, тяжелые углеводороды, керосин. Разделительная жидкость должна быть инертной по отношению к измеряемой среде и не растворять ее в заметных количествах.

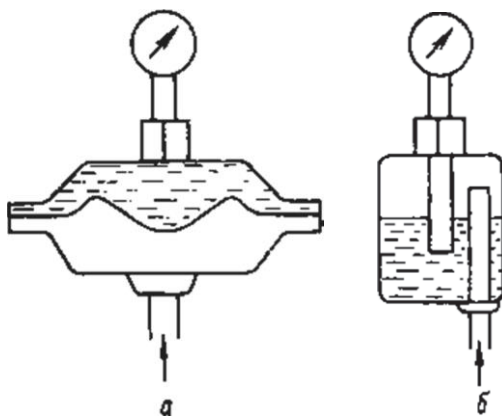


Рис. 3.18. Разделительные устройства:  
*а* — мембранное; *б* — разделительный сосуд

Если пары и жидкости способны при охлаждении затвердевать и закупоривать подводящие к манометру трубки, то защитный сосуд необходимо устанавливать вблизи точки отбора давления и обеспечивать подогрев сосуда и подводящей к нему трубки до температуры выше точки кристаллизации, а манометр удалить от защитного сосуда на некоторое расстояние, заполнив соединяющую трубку жидкостью.

Для защиты от нагревания лучеиспусканием манометр должен быть либо удален от аппарата на достаточное расстояние, либо закрыт экраном, поглощающим тепловые лучи.

Сотрясения, толчки и вибрация сокращают срок службы прибора, ускоряют износ деталей узла передачи манометра, поэтому при измерении давления в аппарате, подверженном сотрясениям, манометр следует устанавливать на отдельном щитке. Перед манометром необходимо предусмотреть приспособление, поглощающее колебания. Такое приспособление (буфер) чаще всего представляет собой дроссель в форме игольчатого вентиля или диафрагмы с очень маленьким отверстием.

Жидкостные и поршневые приборы устанавливают строго по отвесу или уровню. Импульсные линии, передающие давление к манометру, выполняют из металла, стойкого к влиянию измеряемой среды. При измерении давления кислорода уплотнительные прокладки из органических материалов недопустимы.



*Рис. 3.19. Общий вид манометров, вакуумметров, мановакуумметров ДМ2010С<sub>2</sub>, ДВ2010С<sub>2</sub>, ДА2010С<sub>2</sub>*

Приборы предназначены для измерения избыточного и вакуумметрического давления различных сред и управления внешними электрическими цепями от сигнализирующего устройства прямого действия.

## **ТЕМА № 4**

### **Контроль количества и расхода материалов**

#### **§ 4.1. Основные понятия. Единицы измерения**

Количество вещества выражают в единицах объема или массы. В системе СИ за единицу объема принят кубический метр ( $\text{м}^3$ ), а за единицу массы — килограмм (кг). Количество газа измеряют объемным методом. Для получения сравнимых результатов измерений необходимо объем газа привести к следующим нормальным условиям: температура  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $293,15\text{ K}$ ), давление  $101\,325\text{ Па}$  ( $760\text{ мм рт. ст.}$ ), относительная влажность  $\Phi = 0$ . Для твердых и сыпучих тел пользуются понятием насыпной или объемной массы. Насыпная масса сыпучего материала не имеет постоянного значения; она зависит от гранулометрического состава сыпучего материала, т. е. от размера частиц и количественного содержания частиц различной величины в общей массе сыпучего материала. Поэтому количество сыпучего материала определяют взвешиванием.

Приборы, измеряющие количество вещества, называются *счетчиками*. Счетчики измеряют протекающий через них объем вещества за любой промежуток времени: сутки, месяц и т. д. Количество вещества при этом определяется как разность показаний счетчика.

*Расходом вещества* называется количество вещества, проходящее через данное сечение канала в единицу времени. *Массовый расход* определяется в килограммах за секунду, а *объемный расход* — в кубических метрах за секунду. Приборы, измеряющие расход, называются *расходомерами*. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются *расходомерами со счетчиком*. Такие расходомеры позволяют измерять расход и количество вещества.

По ГОСТ 15528–70 в зависимости от принятого метода измерения приборы для измерения расхода и количества подразделяются на:

- расходомеры переменного перепада давлений, основанные на зависимости от расхода перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, установленным в трубопроводе, или элементом трубопровода;
- расходомеры постоянного перепада давлений, основанные на зависимости от расхода вещества вертикального перемещения тела (поплавка), изменяющего при этом площадь проходного отверстия прибора таким образом, что перепад давлений по обе стороны поплавка остается постоянным.

Расходомеры основаны на зависимости от расхода результата взаимодействия движущейся жидкости с магнитным полем.

## **§ 4.2. Измерение количества жидкости и газа**

Количество жидкости или газа можно измерить счетчиками. По принципу действия счетчики подразделяются на *объемные, массовые и скоростные*. Для измерения количества жидкости применяют преимущественно объемные и скоростные счетчики, для измерения объема газа — объемные счетчики. Для каждого счетчика существует определенный минимальный расход, ниже которого резко возрастает основная погрешность.

*Номинальным расходом* называется наибольший длительный расход, при котором погрешность измерения не выходит за пределы установленных норм, а потеря напора не создает в счетчике усилий, приводящих к быстрому износу его деталей.

*Характерным расходом* называется количество вещества, которое проходит через счетчик за 1 час при установленном потоке и потере напора 0,1 МПа. Характерный расход является условной величиной и служит мерой оценки счетчиков различных конструкций.

Потери напора представляют собой разность давлений на входе в счетчик и выходе из него. Калибром счетчика называется диаметр условного прохода входного патрубка, выраженный в миллиметрах.

**Скоростные счетчики.** Эти счетчики служат для измерения количества жидкостей. Они основаны на принципе измерения средней скорости движущегося потока. Количество жидкости связано со средней скоростью движущегося потока соотношением

$$Q = v_{\text{ср}} S, \quad (4.1)$$

где  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость движения вещества, м/с;

$S$  — поперечное сечение потока, м<sup>2</sup>.

О количестве жидкости, прошедшей через прибор, судят по числу оборотов лопастной вертушки, расположенной на пути потока. Считается, что скорость вращения вертушки пропорциональна средней скорости потока

$$n = C v_{\text{ср}}; \quad (4.2)$$

с учетом уравнения (4.1)

$$n = c (Q \setminus S), \quad (4.3)$$

где  $n$  — число оборотов вертушки;

$c$  — коэффициент пропорциональности, характеризующий механические и гидравлические свойства прибора.

По форме вертушки скоростные счетчики разделяются на две группы: с винтовой вертушкой и крыльчатые. Винтовые вертушки размещают параллельно измеряемому потоку, крыльчатые — перпендикулярно ему.

На рис. 4.1 показан скоростной счетчик с винтовой вертушкой, закрепленной на горизонтальной оси. В корпусе 1, снабженном фланцами для присоединения к трубопроводу, установлена вертушка 2 с лопастями, изогнутыми по винтовой линии.

Вертушку изготавливают из пластмассы при рабочей температуре до 30 °С и из латуни при более высоких температурах.

Вертушку делают полой для уменьшения ее веса и давления на цапфы. На ось вертушки перед задним закрытым подшипником V, закрепленным в крестовине 4, насажен червяк 5, сцепляющийся с червячной шестерней, передающей вращение передаточному механизму 6.

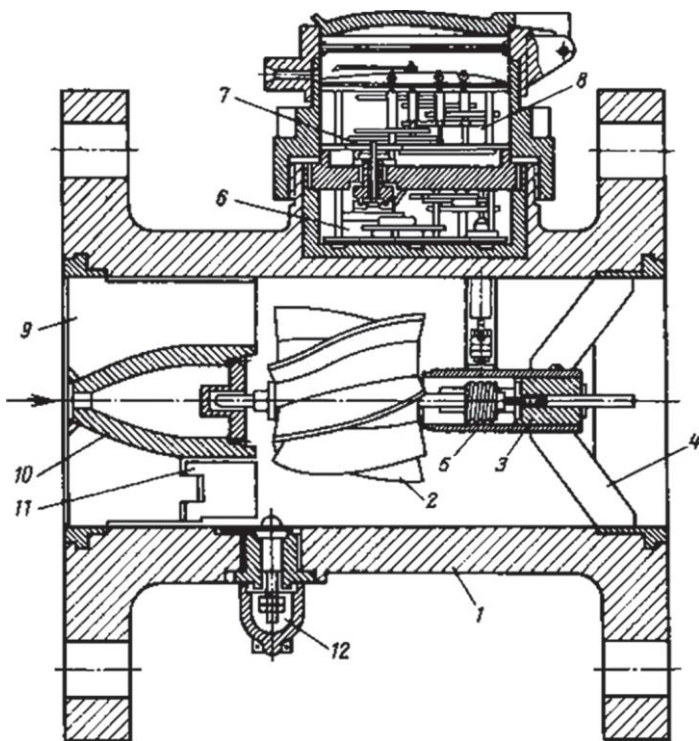


Рис. 4.1. Скоростной счетчик с винтовой вертушкой



От механизма движение передается оси, проходящей через сальник 7, и счетному механизму 8.

Перед вертушкой со стороны входа жидкости установлен струевыпрямитель 9, состоящий из нескольких радиально закрепленных прямых пластин. Конец одной из пластин струевыпрямителя поворачивается вокруг вертикальной оси, образуя лопасть 11, служащую для регулирования счетчика через рычажный привод 12. В струевыпрямителе закреплен передний подшипник 10 оси вертушки. Механическое сопротивление (трение в подшипниках, сальнике и т. п.) влияет на скорость вращения вертушки, а при некоторой минимальной скорости потока вертушка будет неподвижна.

В зависимости от способа подвода жидкости счетчики с крыльчатой вертушкой подразделяются на *одноструйные* и *многоструйные* (рис. 4.2).

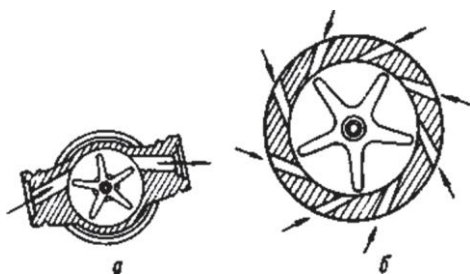


Рис. 4.2. Одноструйный (а) и многоструйный (б) счетчики

Как в одноструйных, так и в многоструйных счетчиках жидкость подводится тангенциально к лопастям вертушки. Счетчики с крыльчатой вертушкой устанавливают на горизонтальных участках трубопроводов.

Счетчики с винтовой вертушкой применяют при давлении жидкости до 1,0 МПа и при длительной нагрузке до 600 м<sup>3</sup>/ч. Погрешность счетчиков  $\pm 2-3$  % действительного значения.

**Объемные счетчики.** Принцип работы объемных счетчиков заключается в измерении определенного объема жидкости, вытесняемого из измерительной камеры под воздействием разности давлений.

Для применения на напорных технологических линиях выпускают объемные лопастные счетчики типа ЛЖ.

Принцип действия лопастных счетчиков основан на том, что поток измеряемой жидкости, поступая через входной патрубок, проходит через измерительную камеру, где тратит часть напора на создание крутящего момента, приводящего во вращение ротор с выдвижными лопастями.

Измерение объемного количества жидкости происходит при периодическом отсечении определенных объемов жидкости, заключенных в полости между двумя лопастями и цилиндрическими поверхностями измерительной камеры и барабана. За один полный оборот ротора отсекаются четыре объема, сумма которых равна емкости измерительной камеры.

В обозначении типа счетчика первое число после букв — диаметр условного прохода счетчика, второе число — рабочее давление, на которое рассчитан счетчик. Лопастные счетчики с обозначением ЛЖА предназначены для агрессивных жидкостей.



*Рис. 4.3. Промышленные объемные счетчики нефтепродуктов серии SM*

Для использования на нефтеперерабатывающих заводах, нефтебазах, АЗС, в топливозаправщиках, аэропортовых заправщиках самолетов, то есть везде, где требуется заправка нефтепродуктов, нужны промышленные объемные счетчики нефтепродуктов (рис. 4.3).

*Технические особенности промышленных объемных счетчиков нефтепродуктов серии SM:*

- современный и надежный регулировочный механизм счетчика позволяет производить бесступенчатую микрорегулировку, благодаря чему достигается высокая точность измерений;

- специальный манифольд отделяет счетчик от измерительной камеры;
- малые потери давления;
- простая конструкция ротора: лопасти очень легко меняются, имеют низкую стоимость, что снижает эксплуатационные расходы;
- коррекция расхода для поддержания хорошей точности на всем протяжении года;
- измерение вязких продуктов до 800 Cst.

**Барабанные счетчики.** Работа этих счетчиков основана на непрерывном отмеривании и отсчете равных объемных порций газа. Число этих объемов регистрируется счетным механизмом (рис. 4.4).

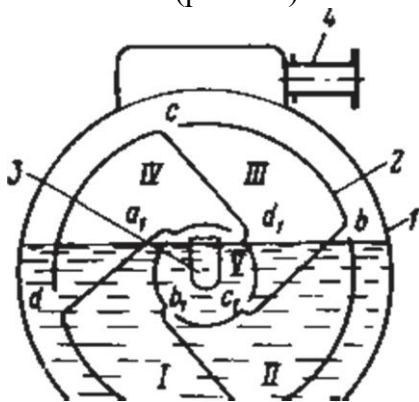


Рис. 4.4. Барабанный счетчик

В герметичном цилиндрическом кожухе 1, заполненном несколько более чем наполовину затворной жидкостью, вращается концентрично расположенный барабан 2, разделенный четырьмя радиальными и одной цилиндрической перегородками на пять камер I — V. Камеры I — IV сообщаются с пространством кожуха 1 щелями  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  и с внутренней камерой V через щели  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  и  $d_1$ .

В камеру V через полую ось входит подающая газ труба 3, а в верхней части кожуха установлена отводящая труба 4.

Радиальные перегородки и соединяющие щели расположены так, что газ последовательно заполняет камеры I — IV. Перепад давлений в трубах 3 и 4 заставляет барабан вращаться по часовой стрелке.

Входная и выходная щели каждой камеры никогда не могут быть одновременно над уровнем жидкости, следовательно, прямой переток газа из трубы 3 в трубу 4 исключается. Каждая камера заполняется определенным постоянным объемом газа, вытесняемым из камеры в кожух прибора при выходе выпускной щели из-под уровня запирающей жидкости. Вращение барабана 2 передается счетному механизму, расположенному снаружи кожуха. За один оборот через барабан проходит объем газа, равный сумме объемов камер, отсекаемых жидкостью.

Запирающей жидкостью служит обычно вода. В случае опасности замерзания воды используют водный раствор хлорида магния или глицерин. Барабанные счетчики применяют для измерения светильного, газогенераторного, коксового и других нейтральных газов, заметно не растворяющихся в затворной жидкости и не воздействующих на материал счетчика. Обязательным условием работы барабанных газовых счетчиков является постоянство уровня жидкости в кожухе счетчика. Для контроля уровня жидкости счетчик снабжают водомерным стеклом или устройством для поддержания постоянства уровня.

Барабанные счетчики газа представляют собой очень точные приборы, их погрешность не превышает  $\pm 0,2\%$ . Однако они редко выпускаются производительностью более  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ , так как при большой производительности габариты их слишком велики.



*Рис. 4.5. Газовые  
барабанные счетчики  
фирмы Ritter*

Газовые счетчики Ritter, как и широко известные в России счетчики ГСБ-400 и РГ-7000, работают по принципу вытеснения с применением мерного модуля-барабана, вращающегося в затворной жидкости (вода или маловязкое масло). Внутри барабана происходит принудительное измерение объема посредством периодического наполнения и опустошения четырех жестких мерных камер.

Нужный диапазон измерений может быть выбран из семи вариантов (типов, моделей), в общей сложности 0,1–18 000 литров в час для температур газов в диапазоне от  $-50$  до  $+120$  °С. Корпус счетчика (сварной пластмассовый или паяный стальной) в стандартном варианте рассчитан на избыточное давление до 50 мбар. Погрешность при номинальном расходе  $\pm 0,2$  % (точное значение указывается в калибровочном сертификате на конкретный прибор).

*Преимущества газовых счетчиков Ritter:*

- высочайшая точность;
- возможность использования как для агрессивных, так и для инертных газов;
- высокая чувствительность при минимальной скорости расхода;
- возможность подключения к компьютеру или регистрирующему устройству;
- возможность подключения электронного индикатора для отображения скорости потока в режиме реального времени;
- при изготовлении приборов использованы химически стойкие пластмассы (PVDF, PP, PVC);
- приборы пригодны для калибровки приборов учета расхода газа;
- счетчики не требуют технического обслуживания;
- срок службы исчисляется несколькими десятками лет.

**Ротационные счетчики.** Счетчики газа ротационные типа РГ предназначены для измерения объемного количества очищенных неагрессивных горючих газов,

используемых в установках коммунальных и промышленных предприятий (природного, сланцевого, генераторного, водяного, коксового, доменного, светильного, масляного, смешанного, пропан-бутана).

Ротационные счетчики РГ состоят из трех основных узлов: корпуса, счетного механизма и дифференциального манометра. В корпусе размещены два ротора восьмеричной формы, удерживаемые во взаимно перпендикулярном положении двумя парами шестерен, которые смонтированы на шейках роторов. При протекании газа через счетчик давление на выходе несколько ниже, чем на входе, поэтому роторы вращаются в направлениях, указанных стрелками на рис. 4.6. За каждый оборот роторов счетчик пропускает постоянный объем газа. Вращательное движение роторов передается счетному механизму, установленному на передней крышке счетчика. Счетный механизм показывает объем прошедшего через счетчики газа в кубометрах. Для наблюдения за нормальной работой счетчика служит дифференциальный манометр, разность уровней подкрашенной воды которого показывает потерю напора в счетчике.

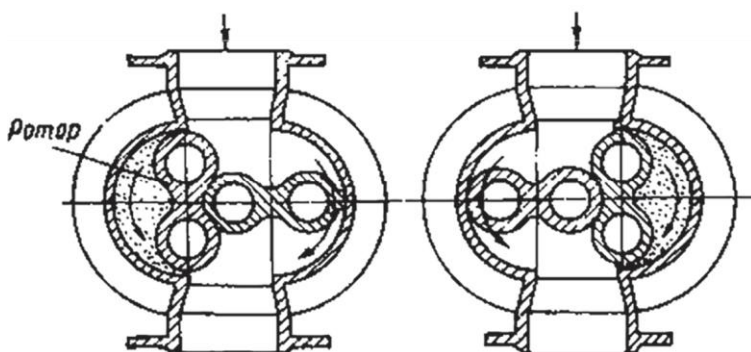


Рис. 4.6. Схема движения газа в роторном счетчике

Ротационные счетчики типа РГ рассчитаны на расход до  $1\,000\text{ м}^3/\text{ч}$ ; погрешность показаний  $\pm 2,5\%$ .

Насосы-дозаторы с возвратно-поступательным движением поршня (рис. 4.7) служат для дозирования различных химически активных жидкостей. На всасывающей и нагнетательной линиях этих насосов установлены клапаны.

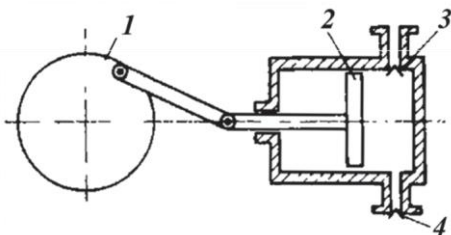


Рис. 4.7. Поршневой насос дозатора

Когда привод 7 перемещает поршень 2 справа налево, происходит наполнение цилиндра через входной клапан 3, а когда поршень, достигнув крайнего положения, перемещается слева направо, клапан 3 на входе закрывается, а клапан 4 на выходе открывается и жидкость вытесняется в приемное устройство.

### § 4.3. Измерение количества твердых веществ

Устройства измерения и дозирования массы широко распространены в промышленности. Эти устройства предназначены либо для получения измерительной информации о массе вещества (средства измерения), либо для получения измерительной информации и автоматического порционирования требуемой массы вещества (средства дозирования, или автоматические дозаторы).

Средства дозирования массы по месту, занимаемому в управляемом технологическом процессе, могут выполнять и дополнительную функцию — исполнительных устройств системы управления. Функция исполнительного устройства реализуется средствами дозирования тогда, когда они используются для подачи в управляемый объект заданного количества сырья и полуфабрикатов.

По назначению средства измерения и дозирования массы подразделяют на пять основных групп:

- весы и дозаторы весовые порционные;
- весы транспортные;
- весы монорельсовые;
- весы и дозаторы автоматические непрерывного действия;
- весы специальные технологические.

**Весы и дозаторы весовые порционные.** Весы и дозаторы весовые порционные предназначены для суммарного учета материалов в потоке и для дозирования и фасовки сыпучих и жидких материалов.

К циферблатным приборам относятся те устройства, работа которых основана на уравнивании силы тяжести взвешиваемого материала.

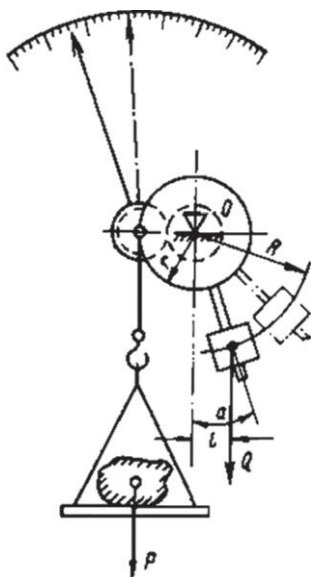


Рис. 4.8. Квадрантные весы

Весы состоят из следующих основных узлов: счетчика, электрооборудования, циферблатного указательного прибора, привода, неравноплечей рычажной системы, ковша, рамы с автоматическим механизмом и приводом, воздушной системы, шнекового питателя и станции управления. Величина порции, необходимой для дозирования, заранее задается вручную на циферблатном приборе установкой задающих стрелок с бесконтактными датчиками против соответствующих делений шкалы. Весы включают в работу кнопкой или от внешнего импульса. Полиэтилен подается шнековым питателем в ковш, который подвешен на одном из плеч главного рычага неравноплечей рычажной системы.



По мере заполнения взвешиваемым материалом ковш перемещается и через рычажную систему передает свое движение стрелке циферблатного указательного прибора. При приближении массы порции, набранной в ковше, к заданной величине система автоматики переключает электродвигатель привода питателя с большего числа оборотов на меньшее, и начинается досыпка.

Когда порция материала в ковше достигает заданной величины, срабатывает система автоматики, которая включает электродвигатель привода питателя, закрывает заслонку питателя и автоматически или после получения команды (импульса) включает пневматический цилиндр открытия заслонки ковша. Взвешенная порция материала высыпается из ковша. Заслонка ковша закрывается под действием собственного веса, при этом срабатывает счетчик, фиксируя взвешенную порцию. После закрытия заслонки ковша цикл взвешивания повторяется.

Весы снабжены механическим пятизначным счетчиком количества отвешиваемых порций. Точность отвешивания контролируется по шкале циферблатного указательного прибора. Класс точности весов 1,5.

Для дозирования сыпучих материалов применяют ленточные весовые дозаторы с пневматическим вибрационным питателем и пневматическим регулятором. Эти дозаторы используют там, где не допускается применение электромагнитных вибраторов.

Работа дозатора основана на сравнении действительной массы дозируемого материала с заданной. Пропорционально изменению весовой нагрузки на транспортер изменяется давление сжатого воздуха. Погрешность автоматических весовых дозаторов составляет  $\pm 2\%$  от максимального значения шкалы вторичного прибора. При постоянной скорости транспортера производительность в кг/с весовых дозаторов

$$Q_m = q_m \times v_m, \quad (4.11)$$

где  $q_m$  — масса на ленте транспортера, кг/м на единицу длины;

$v_m$ , — постоянная скорость движения ленты транспортера, м/с.

Применение современных электронных и пневматических приборов в весовых дозаторах с электромагнитными пневматическими вибропитателями позволяет использовать весы в качестве воспринимающих элементов в системах комплексной автоматизации непрерывных технологических процессов.



*Рис. 4.9. Весы  
квадрантные  
ВЛКТ-500*

Принцип действия квадрантных весов основан на уравнивании моментов, создаваемых взвешиванием грузов, отклонением квадранта и встроенными гирями. По конструкции представляют собой весы с двумя призмами с верхним расположением грузоприемной чашки и полным механическим гиренакладыванием.

Весы квадрантные ВЛКТ-500 (рис. 4.9) имеют специальный механизм для автоматической компенсации негоризонтальности при установке их на рабочем столе, а также делительное устройство, которое позволяет исключить субъективные ошибки при отсчете. Широкий диапазон отсчетной шкалы, наличие механизма компенсации тары, доступность чашки и удобство обслуживания значительно повышают производительность весов. Результат взвешивания определяется по отсчетной шкале и счетчиках гиревого механизма и делительного устройства.

*Характеристики весов квадрантных ВЛКТ-500:*

- наибольший предел взвешивания: 500 г;
- цена деления: 1 г;
- пределы допускаемой погрешности взвешивания: 20 мг;
- диапазон взвешивания по шкале: 0–100 г;
- дискретность: 10 мг;
- диаметр чашки: 150 мм;
- вес: 10 кг;
- габариты: 160 × 280 × 350 мм.

#### § 4.4. Измерение расхода методом переменного перепада давления

**Основы теории.** Из парка существующих расходомеров около 80 % составляют расходомеры переменного перепада давлений. Такое широкое их применение объясняется невысокой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации, а также отсутствием необходимости в дорогостоящих образцовых установках для градуировки. Из более чем двухсот типов используемых в мировой практике расходомеров эти расходомеры являются единственными нормализованными средствами измерения расхода. У нас в стране данные расходомеры нормализованы ГОСТ 8.563.3-97 ГСИ, который введен в действие взамен РД 50-213-80.

Известно, что объемный расход вещества, протекающего по трубопроводу, определяется как произведение скорости потока на площадь отверстия истечения  $F$ , т. е.

$$Q = v \times F. \quad (4.12)$$

Массовый расход получают умножением объемного расхода на плотность  $\rho$  жидкости, газа или пара, т. е.

$$G = Q \times \rho. \quad (4.13)$$

При прохождении вещества через сужающее устройство, установленное в трубопроводе, скорость его увеличивается. Это следует из условия неразрывности струи

$$Q = v_1 \times F = v_2 f, \quad (4.14)$$

где  $F$  и  $f$  — соответственно площади сечения трубопровода и сужающего устройства;

$v_1$  и  $v_2$  — средние скорости движения вещества в трубопроводе и в сужающем устройстве.

Более высокая скорость  $v_2$  по сравнению с  $v_1$  обусловлена переходом части потенциальной энергии потока в кинетическую.

Из уравнения (4.14) следует, что

$$v_2 = (F/f) \times v_1, \quad (4.15)$$

т. е. при постоянном отношении  $F/f$  скорость  $v_2$  тем больше, чем выше скорость  $v_1$  вещества в трубопроводе или чем больше расход. Отношение  $F/f$  называют *модулем сужающего устройства* и обозначают как  $m$ , т. е.

$$m = f/F = d_2/D_2, \quad (4.16)$$

где  $d$  и  $D$  — соответственно диаметры проходных сечений сужающего устройства и трубопровода.

Из уравнений (4.15) и (4.16) получим

$$v = v_1/m. \quad (4.17)$$

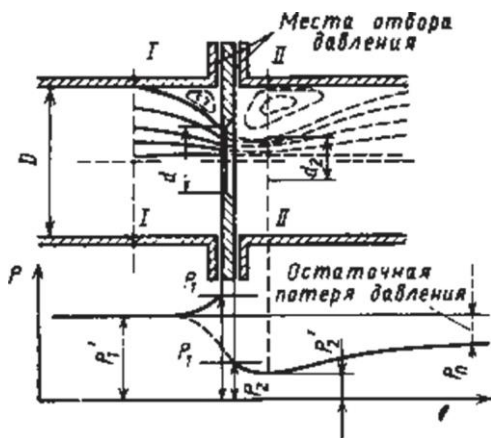


Рис. 4.10. Вид потока и распределение давления при размещении сужающего устройства в трубопроводе

На рис. 4.10 показаны вид потока и изменение давления измеряемой среды при прохождении ее через сужающее устройство. Если до сужающего устройства статическое давление в трубопроводе равно  $P'_1$  то в сужающем устройстве оно резко падает, затем постепенно возрастает до нового установившегося значения.

При этом давление в трубопроводе за сужающим устройством не достигает значения  $P'_1$ , так как часть энергии расходуется на трение о стенки сужающего устройства и завихрения потока после сужающего устройства. Величина безвозвратных потерь равна  $P_n$ . Перед сужением давление несколько возрастает до  $P_1$ , что обусловлено сжатием потока перед сужающим устройством.

Минимальное давление  $P'_2$  наблюдается на некотором расстоянии от сужающего устройства. Давление в проходном сечении сужающего устройства равно  $P_2$ . Разность давлений  $P_1 - P_2$  является перепадом, зависящим от расхода среды, протекающей через трубопровод. Найдем зависимость между перепадом давлений за сужающим устройством и расходом. В соответствии с уравнением Бернулли для сечения I—I и II—II для горизонтального участка трубопровода (см. рис. 4.10)

$$P_1 / \rho_1 + v_1^2 / 2 = P_2 / \rho_2 + v_2^2 / 2 \quad (4.18)$$

или

$$P_1 / \rho_1 - P_2 / \rho_2 = (v_2^2 - v_1^2) / 2,$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — соответственно плотности измеряемой среды в сечениях I—I и II—II.

Для несжимаемой жидкости  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ . Тогда

$$P_1 - P_2 = (\rho v_2^2 - \rho v_1^2) / 2. \quad (4.20)$$

Из уравнения (4.16) следует, что  $v_1 = m \cdot v_2$ . Подставляя в уравнение (4.20) значение  $v_1$  из (4.16), получим

$$P_1 - P_2 = \rho (v_2^2 - m^2 v_2^2) / 2 = \rho [(1 - m^2) / 2] v_2^2. \quad (4.21)$$

Решая уравнение (4.21) относительно получим

$$v_2 = \left( 1 / \sqrt{1 - m^2} \right) \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho}. \quad (4.22)$$

Измерить давление в сечении II—II практически невозможно. Перепад давлений обычно измеряют на участках трубопровода перед сужающим устройством и за ним, где перепад  $P'_1 - P'_2$  отличается от рассматриваемого и несколько больше, чем  $P_1 - P_2$ . Введя в уравнение (4.22) поправочный коэффициент  $\mu$ , получим

$$v_2 = \mu / \sqrt{1 - m^2} \left[ \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho} \right]. \quad (4.23)$$

Определение поправочного коэффициента  $\mu$  в каждом конкретном случае практически не представляется возможным. Он зависит от характера движения жидкости или газа и является функцией критерия (числа) Рейнольдса  $Re$ . Для различных типоразмеров сужающих устройств на основе большого числа экспериментов найдены коэффициенты  $\alpha$ , равные первому члену правой части равенства (4.23), т. е.

$$\alpha = \mu / \sqrt{1 - m^2}. \quad (4.24)$$

Этот коэффициент, учитывающий расхождение между теоретической и действительной скоростями, называется коэффициентом расхода. Подставляя значение  $\alpha$  из уравнения (4.24) в уравнение (4.23), получим

$$v_2 = \alpha \sqrt{(2/\rho)(P_1 - P_2)}, \quad (4.25)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — давление в трубопроводе по обе стороны сужающего устройства.

В соответствии с (4.12) уравнения расхода для несжимаемой жидкости в объемных (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ) и массовых (кг/с) единицах будут соответственно иметь вид

$$Q = \alpha f \sqrt{(2/\rho)(P_1 - P_2)}; \quad (4.26)$$

$$Q_m = \alpha f \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)}, \quad (4.27)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — давления, Па;

$\rho$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$f$  — площадь,  $\text{м}^2$ .

Коэффициент расхода является функцией модуля и критерия Рейнольдса, т. е.

$$\alpha = f(m Re). \quad (4.28)$$

При измерении расхода сжимаемых сред (газов и паров), особенно при больших перепадах давлений в сужающем

устройстве, необходимо учитывать уменьшение плотности  $\rho$ , вызванное снижением давления при прохождении через сужающее устройство, поэтому массовый, а также объемный расход, отнесенный к начальному значению  $\rho$ , несколько уменьшится.

Время прохождения газов и паров через сужающее устройство настолько незначительно, что их сжатие и последующее расширение происходят практически без обмена тепла с окружающей средой, т. е. адиабатически. Поэтому уравнения расхода для газов и паров соответственно в объемных и массовых долях имеют вид

$$Q = \alpha \varepsilon f \sqrt{(2/\rho)(P_1 - P_2)}; \quad (4.29)$$

$$Q_m = \alpha \varepsilon f \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}, \quad (4.29 \text{ а})$$

где  $\varepsilon$  — поправочный множитель на расширение измеряемой среды, называемый коэффициентом расширения;

$P_1$  — плотность потока перед входом потока в отверстие сужающего устройства.

Уравнения (4.29) и (4.29 а) действительны до тех пор, пока скорость потока в сужающем устройстве остается меньше критической, т. е. меньше скорости звука в данной среде. Уравнения расхода для газов и паров отличаются от уравнений расхода для несжимаемой жидкости только коэффициентом  $\varepsilon$ . Значения коэффициента расширения  $\varepsilon$  для различных сужающих устройств и разных случаев измерения даны в приложениях ГОСТ 8.563.3–97 ГСИ.

Расходомер (рис. 4.11) состоит из следующих основных частей: измерительных участков трубопровода 1 до и после сужающего устройства; сужающего устройства 2; расходомерного дифференциального манометра 4; интегрирующего устройства 5, определяющего расход за определенный промежуток времени (смену, сутки); импульсных линий 3,

служащих для соединения с дифманометром измерительных участков трубопровода.

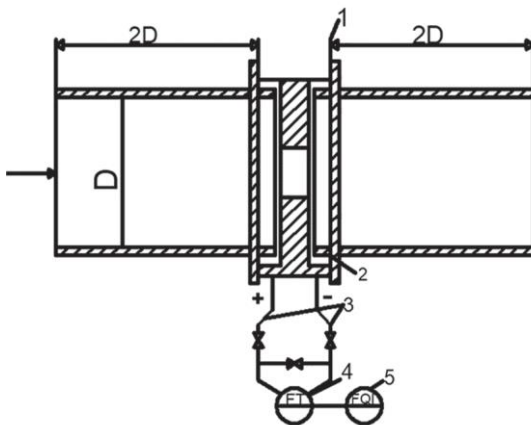


Рис. 4.11. Расходомер

Требования к исполнению и монтажу измерительных участков трубопровода изложены в ГОСТ 8.563.3–97 ГСИ. Эти правила устанавливают требования к выполнению расходомерных устройств при их разработке, проектировании, монтаже, эксплуатации и поверке.

**Стандартные сужающие устройства.** К стандартным (нормализованным) сужающим устройствам относятся диафрагмы, сопла и трубы Вентури, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8.563.3–97 ГСИ. Они служат для измерения расхода вещества и не имеют индивидуальной градуировки. Допустимые интервалы диаметров трубопроводов  $D$  и относительных площадей сужающих устройств  $m$  должны находиться в следующих пределах:

- $50 \text{ мм} \leq D \leq 1\,000 \text{ мм}$ ;  $0,05 \leq m \leq 0,64$  для диафрагм с угловым способом отбора перепада давлений;
- $50 \text{ мм} \leq D \leq 760 \text{ мм}$ ;  $0,04 \leq m \leq 0,56$  для диафрагм с фланцевым способом отбора перепада давлений;



- диаметр отверстия диафрагмы независимо от способа отбора перепада давлений  $d \geq 12,5$  мм;
- $50 \text{ мм} \leq D$ ;  $0,05 \leq m \leq 0,64$  для сопел в случае измерения расхода газа;
  - $30 \text{ мм} \leq D$ ;  $0,05 \leq m \leq 0,64$  для сопел в случае измерения расхода жидкости;
  - $0,65 \text{ мм} \leq D \leq 500 \text{ мм}$ ;  $0,05 \leq m \leq 0,60$  для сопел Вентури; диаметр отверстия сопел и сопел Вентури  $\geq 15$  мм;
  - $50 \text{ мм} \leq D \leq 1\,400 \text{ мм}$ ,  $0,10 \leq m \leq 0,60$  для труб Вентури.

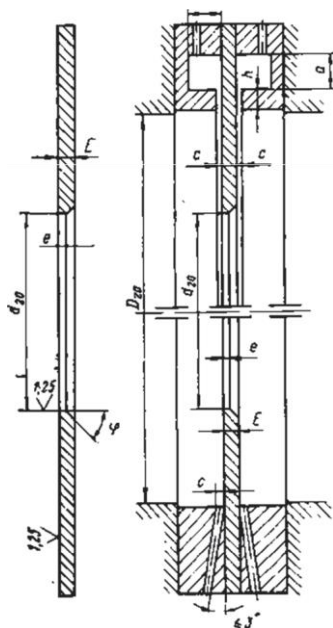


Рис. 4.12. Основные геометрические размеры камерных стандартных диафрагм

В случае измерения расхода газа отношение абсолютных давлений на выходе из сужающего устройства и входе в него должно быть больше или равно 0,75.

При измерении расхода газов и жидкостей допускается применять как угловой, так и фланцевый способы отбора перепада давлений на диафрагмах и угловой способ отбора на соплах.

Камерные диафрагмы (рис. 4.12, 4.13) применяют для установки в трубопроводах диаметром  $D_{20}$  до 500 мм. Стандартные камерные диафрагмы обозначаются ДК, а дисковые ДН. Обычно в обозначении диафрагм после букв указывают максимальное условное давление  $P_y$ , на которое рассчитана диафрагма. Например, ДК6 (на 6 кгс/см<sup>2</sup>).



Рис. 4.13. Диафрагма  
камерная моделей  
ДКС 0,6–200, ДКС 0,6–225,  
ДКС 0,6–250, ДКС 0,6–300,  
ДКС 0,6–350

Диафрагмы предназначены для измерения расхода жидкостей, газов, пара по методу переменного перепада давления с использованием стандартных сужающих устройств по ГОСТ 8.563.1–97, ГОСТ 8.563.2–97, ГОСТ 8.563.3–97.

Приборы используются в комплекте с преобразователями разности давления или дифманометрами. Диафрагмы, камерные и бескамерные, устанавливаются во фланцевых разъемах трубопроводов.

Диафрагмы могут комплектоваться сосудами:

- *уравнительными конденсационными (СКМ)*, предназначенными для поддержания постоянства и равенства уровней конденсата в системе, передающей перепад давления от диафрагм к дифманометрам;
- *уравнительными (СУМ)*, предназначенными для дифманометров при измерении уровня жидкости и перепада давления или расхода с температурой свыше 100 °С;
- *разделительными (СР)*, предназначенными для защиты внутренних полостей дифманометров от непосредственного воздействия измеряемых агрессивных сред путем передачи измеряемого давления через разделительную жидкость.

Перепад давлений при фланцевом способе отбора следует измерять через отдельные цилиндрические отверстия.

Стандартные сопла могут применяться без индивидуальной градуировки в трубопроводах  $D_{20} \geq 50$  мм при условии, что  $0,05 \leq m \leq 0,65$ .

Сопла особенно удобны для измерения расхода газов и перегретого пара, если  $[(P_1 - P_2) / P_2] < 0,1$ , а также для измерения расхода пара высокого давления и агрессивных газов в трубопроводах диаметром  $D_{20} \leq 200$  мм. По сравнению с диафрагмами они менее чувствительны к коррозии, загрязнениям и обеспечивают несколько большую точность измерения.

Принцип действия заключается в следующем: в трубопроводе, по которому протекает жидкое или газообразное вещество, устанавливается диафрагма, создающая местное сужение потока. Вследствие перехода части потенциальной энергии давления в кинетическую среднюю скорость потока в суженном сечении становится меньше статического давления перед сужающим устройством. Разность этих давлений (перепад давления) тем больше, чем больше расход протекающего вещества.

Стандартные сопла Вентури могут применяться без индивидуальной градуировки для диаметров трубопроводов  $D_{20} > 50$  мм при  $0,05 < m < 0,6$  и при  $d_{20} \geq 20$  мм.

Сопло Вентури (рис. 4.14) состоит из профильной входной части, цилиндрической средней части и выходного конуса. Сопло Вентури может быть длинным и коротким: у первого наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода, у второго — меньше. Перепад давлений следует измерять через кольцевые камеры.

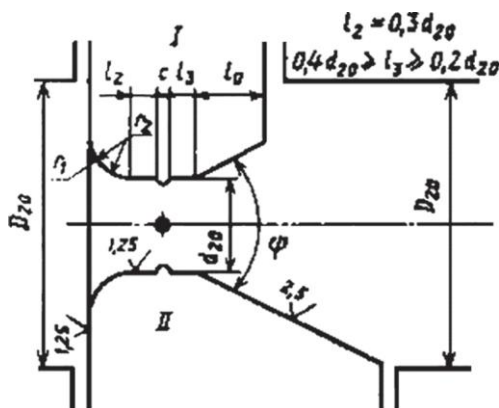


Рис. 4.14. Основные геометрические параметры сопел Вентури:  
 I — короткое;  
 II — длинное для  $m < 0,444$ ,  
 при  $m > 0,444$  профиль выполняется аналогично соплу с  $m < 0,444$

Стандартные трубы Вентури можно применять в трубопроводах диаметром от 100 до 800 мм при условии, что  $0,2 \leq m \leq 0,5$ . Труба Вентури называется *длинной*, если наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру

трубопровода, или *короткой*, если указанный диаметр меньше диаметра трубопровода.

Давления в горловине и входном патрубке следует отбирать через отверстия в стенках и через усредняющие камеры.

К преимуществам труб Вентури следует отнести меньшую потерю давления по сравнению с потерями в сужающих устройствах других типов.

**Расходомерные дифманометры.** Расходомерные дифманометры обычно устанавливают совместно с диафрагмами, перепад давления на которых однозначно связан с расходом среды, протекающей по трубопроводу.

На рис. 4.15 показана принципиальная схема дифманометра типа ДСП-3, предназначенного для непрерывного преобразования расхода водорода, кислорода, оксидов азота. Дифманометр ДСП-3 с унифицированным выходным сигналом состоит из измерительного блока ИБ и пневматического преобразователя ПИП. Измерительный блок имеет плюсовую и минусовую камеры, разделенные основанием 7. В камерах расположены чувствительные элементы — сильфоны 1 и 5 диаметром 20 мм. Сильфоны с одной стороны жестко связаны с основанием, а с другой — с клапанами 2 и 6, снабженными уплотняющими резиновыми кольцами. Внутренняя полость 4 узла сильфонов заполнена кремнийорганической жидкостью. Изменение объема жидкости, вызванное колебаниями температуры, воспринимается компенсационным сильфоном 3. Вывод с рычага 8 из основания уплотнен мембраной 9. Две упругие ленты удерживают рычаг 8 от осевого перемещения при воздействии на мембрану рабочего давления. Рычаг 8 при помощи рычага 10 связан с пневмосиловым преобразователем ПИП.

Измеряемый перепад давления ( $P_2 - P_i$ ) воспринимается сильфонами 1 и 5 и преобразуется в пропорциональное усилие, которое при помощи рычагов 11 и 12

пневмосилового преобразователя уравнивается усилием  $F$  сильфона обратной связи 17.

При изменении измеряемого перепада давления изменяется усилие  $N$ , происходит незначительное перемещение рычажной системы и заслонки 14 индикатора рассогласования 15. Индикатор рассогласования преобразует это перемещение в управляющий сигнал давления сжатого воздуха на выходе усилителя 16.

Выходной сигнал усилителя 16 поступает в линию дистанционной передачи и в сильфон обратной связи 17. Значение выходного сигнала  $P_{вых}$ , пропорциональное измеряемому перепаду давления, изменяется винтом настройки 13. В расходомерах переменного перепада давлений применяют механические, электрические и пневматические счетчики.

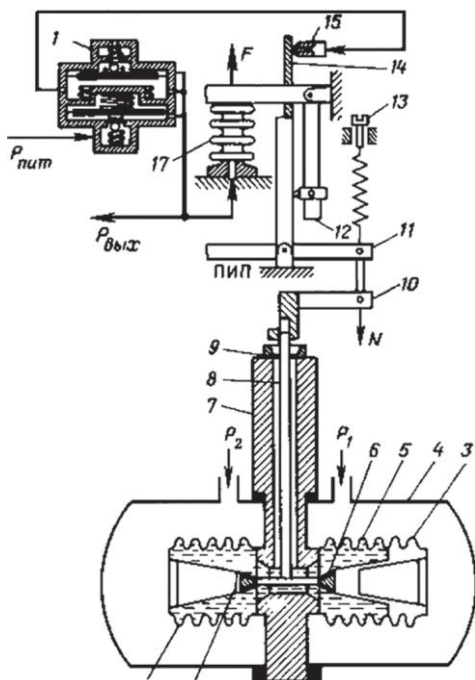


Рис. 4.15. Дифманометр ДСП-3

На рис. 4.16 показана принципиальная схема пневматического интегрирующего прибора типа ПИК-1.

Действие интегрирующего прибора основано на принципе силовой компенсации. Усилие на приемном элементе-сильфоне 1, возникающее от входного пневматического сигнала, непрерывно уравнивается усилием, развиваемым центробежным регулятором 7, установленным на роторе 8. Скорость ротора (и центробежного регулятора), приводимого во вращение струей сжатого воздуха, вытекающего из разгонного сопла 6 пневмореле 5, зависит от давления в системе «сопло — заслонка» (3, 4), зазор которой пропорционален перемещению приемного сильфона.

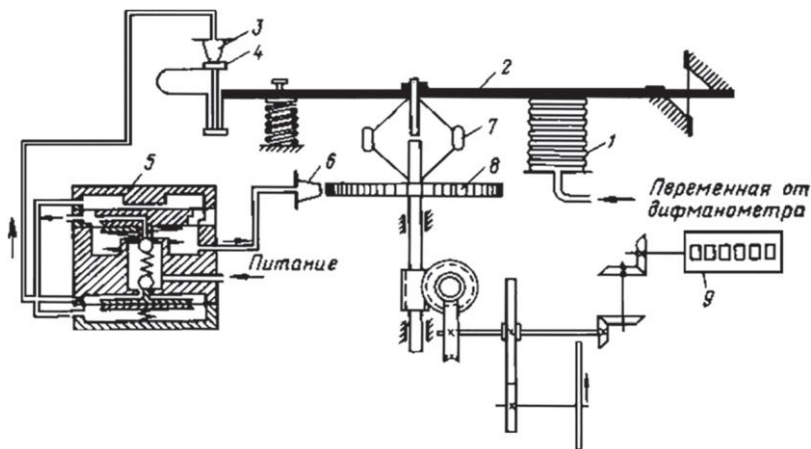


Рис. 4.16. Принципиальная схема пневматического интегрирующего прибора типа ПИК-1

При определенной скорости вращения, соответствующей измеряемому расходу, силы, приложенные к рычагу 2 со стороны сильфона и со стороны центробежного регулятора, уравниваются. Вращение ротора центробежного регулятора передается на ось счетчика 9.

Скорость вращения ротора связана линейной зависимостью с расходом, в то время как сигнал от дифманометра,

поступающий на вход интегратора, находится в квадратичной зависимости от расхода. В приборе происходит автоматическое извлечение корня в следующем порядке.

Выходной сигнал, а следовательно, и сила со стороны приемного сильфона, связаны квадратичной зависимостью с расходом  $Q$

$$P = f(Q^2). \quad (4.29)$$

Центробежная сила, а следовательно, и усилие центробежного регулятора, связаны квадратичной зависимостью со скоростью вращения ротора  $w$

$$N = f(Q^2). \quad (4.30)$$

Но, как указывалось выше, эти силы при установившемся вращении равны:  $P = N$ ; следовательно, расход линейно связан со скоростью вращения ротора

$$Q = f(w). \quad (4.31)$$

Показания счетчика при любом максимальном расходе, соответствующем входному давлению 100 кПа, в течение 1 ч. изменяются на 120 единиц. Поэтому, чтобы найти истинный расход за любой промежуток времени, необходимо разность показаний счетчика, снятую за этот период времени, умножить на коэффициент, величина и размерность которого должны соответствовать шкале.

Для более точного снятия показаний в приборе имеется диск точного отсчета, один оборот которого соответствует единице счетчика.

**Основные правила установки и эксплуатации расходомеров.** Заполнение дифманометра уравнивающей жидкостью, его монтаж и подключение к соединительным линиям для измерения перепада давлений на сужающем устройстве следует производить в соответствии с руководством по монтажу и эксплуатации прибора, а также по требованиям ГОСТ 8.563.3–97 ГСИ. Выбор дифманометра по параметрам окружающей среды и его применение для заданных рабочих

условий измерения расхода должны соответствовать требованиям технической документации завода-изготовителя.

Допускается подключение к одному сужающему устройству двух и более дифманометров; при применении интегрирующих дифманометров одновременная их работа не допускается. Допускается подключение соединительных линий одного дифманометра к соединительным линиям другого дифманометра и подключение манометра к «плюсовой» импульсной линии дифманометра, если это не оказывает влияния на процесс измерения. Соединительные линии для подключения элементов телемеханики должны быть проложены отдельно от других соединительных линий по кратчайшему расстоянию вертикально или с уклоном к горизонтали не менее 1:10. Длина линий не должна превышать наибольшей допустимой длины, указанной в руководстве по монтажу и эксплуатации дифманометра. Соединительные линии должны быть защищены от действия внешних источников тепла или холода.

При измерении расхода горячего вещества ( $t \geq 100^\circ\text{C}$ ) необходимо обеспечить равенство температур в обеих соединительных линиях. Соединительные линии должны прокладываться таким образом, чтобы исключить в них скопление воздушных пузырьков (при измерении расхода жидкости) и конденсата (при измерении расхода газа или пара). Для этих целей на соединительных линиях рекомендуется устанавливать газосборник или отстойные сосуды. При измерении расхода агрессивных сред передача измеряемого давления должна осуществляться через разделительную жидкость, заливаемую в дифманометр. Жидкость служит для защиты внутренних полостей дифманометров от воздействия измеряемой среды. В этом случае на участках соединительных линий между дифманометром и сужающим устройством подключают разделительные сосуды. Конструкции разделительных сосудов и схемы их установок следует выбирать по ГОСТ.



**Требования к соединительным линиям для газов.** При измерении расхода газа дифманометр рекомендуется устанавливать выше сужающего устройства (рис. 4.17, а). При расположении дифманометра ниже сужающего устройства должны предусматриваться отстойные сосуды в низших точках соединительных линий (рис. 4.17, б).

Для горизонтальных трубопроводов соединительные линии следует подключать к верхней половине сужающего устройства.

При измерении расхода пара должно быть обеспечено постоянство и равенство уровней конденсата в обеих соединительных линиях. Это достигается размещением вблизи сужающего устройства уравнительных конденсационных сосудов, которые вместе с участками соединительных линий между сосудами и дифманометром заполняют конденсатом (водой).

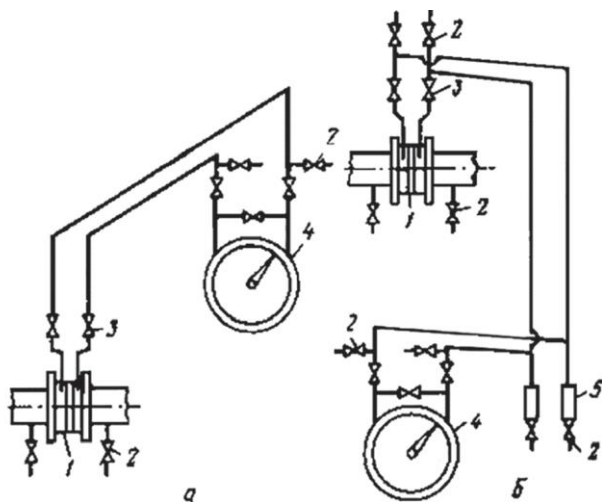


Рис. 4.17. Схемы соединительных линий при измерении расхода газа:  
1 — сужающее устройство; 2 — продувочный вентиль; 3 — вентиль;  
4 — дифманометр; 5 — отстойный сосуд

Трубки, соединяющие сужающее устройство с сосудами, на участках вблизи сосудов должны располагаться

горизонтально и на одном уровне. Эти трубки должны быть термоизолированы.

Дифманометр следует располагать ниже сужающего устройства (рис. 4.18, а). При  $P > 0,2$  МПа допускается устанавливать дифманометр выше сужающего устройства (рис. 4.18, б). Данная схема применима также при расположении дифманометра ниже сужающего устройства на расстоянии не более 1,5 м.

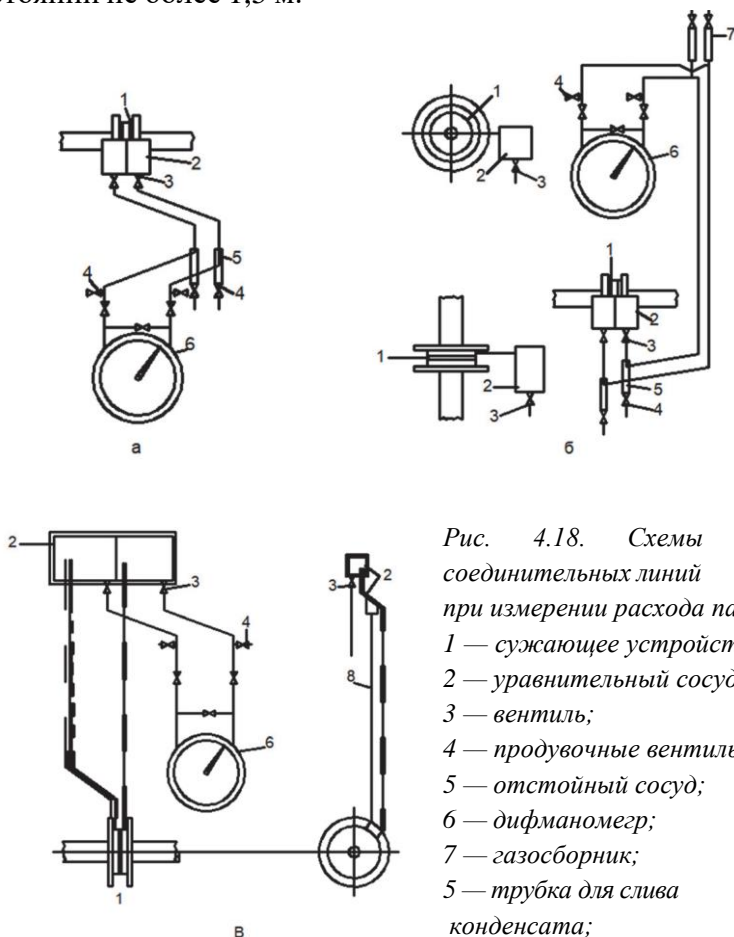


Рис. 4.18. Схемы соединительных линий при измерении расхода пара:  
 1 — сужающее устройство;  
 2 — уравнильный сосуд;  
 3 — вентиль;  
 4 — продувочные вентиль;  
 5 — отстойный сосуд;  
 6 — дифманометр;  
 7 — газосборник;  
 5 — трубка для слива конденсата;  
 9 — термоизоляция

Схема, приведенная на рис. 4.18, в, допустима при  $P \leq 0,2$  МПа и расстоянии между трубопроводом и сосудами не более 4 м. При этом трубки, соединяющие сужающее устройство с сосудами, должны иметь внутренний диаметр не менее 25 мм. Указанные трубки, а также сосуды должны быть термоизолированы.

**Требования к соединительным линиям для жидкостей.** При измерении расхода жидкости дифманометр рекомендуется устанавливать ниже сужающего устройства. Соединительные линии на всем протяжении должны иметь уклон в одну сторону. В случае расположения дифманометра выше сужающего устройства в высших точках линий необходимо помещать газосборники. Для горизонтальных трубопроводов соединительные линии следует подключать к нижней половине сужающего устройства. Перед дифманометром рекомендуется устанавливать отстойные сосуды (на схемах показаны пунктиром). Применение сосудов обязательно, если из измеряемой жидкости выпадают осадки.

При измерении расхода горячих жидкостей в соединительные линии следует включать уравнильные сосуды, обеспечивающие равенство плотностей жидкости в трубах, соединяющих сосуды с прибором.

## § 4.5. Расходомеры постоянного перепада давлений



Рис. 4.19. Схема работы ротаметра

Наиболее распространенными приборами этой группы являются расходомеры со свободно перемещающимся в корпусе поплавком (ротаметры).

Принципиальная схема ротаметра показана на рис. 4.19.

Проходящий через ротаметр снизу поток жидкости или газа поднимает поплавков вверх до тех пор, пока расширяющаяся кольцевая щель между телом поплавка и стенками конусной трубки не достигнет такой величины, при которой действующие на поплавков силы уравниваются и он останавливается на той или иной высоте в зависимости от величины расхода. При неизменном расходе поплавков неподвижен.

В работающем ротаметре поплавков полностью погружен в измеряемую среду. Вес погруженного поплавка  $G_1$  определяется уравнением

$$G_1 = V_n g (\rho_n - \rho_c), \quad (4.32)$$

где  $V_n$  — объем поплавка;

$\rho_n$  и  $\rho_c$  — плотности поплавка и измеряемой среды соответственно;

$g$  — ускорение свободного падения.

Сила  $G_2$ , действующая на поплавков со стороны измеряемого потока, равна

$$G_2 = (P_1 - P_2) F_0, \quad (4.33)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — давления среды перед поплавком и за ним;

$F_0$  — наибольшее поперечное сечение поплавка.

В состоянии равновесия (поплавков неподвижен)  $G_1 = G_2$ , т. е.

$$V_n g (\rho_n - \rho_c) = (P_1 - P_2) F_0 \quad (4.34)$$

или

$$P_1 - P_2 = V_n g (\rho_n - \rho_c) / F_0. \quad (4.35)$$

Из полученного уравнения видно, что независимо от положения поплавка перепад давлений на нем постоянен и не зависит от измеряемого расхода. Это объясняется постоянством скорости измеряемой среды при изменении ее расхода, что обусловлено изменением площади кольцевого зазора между поплавком и трубкой. Зависимость положения поплавка от измеряемого расхода линейна. Этим и определяется равномерность шкалы ротаметра.

Ротаметры выполняются стеклянной или металлической трубкой. На рис. 4.20 показан ротаметр со стеклянной конической трубкой 3, закрепленной в двух металлических головках 1 и 6, снабженных сальниками и фланцами для включения в вертикальный участок трубопровода.

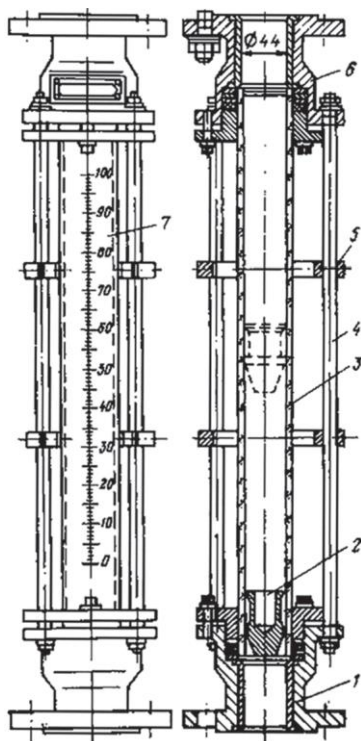


Рис. 4.20. Ротаметр со стеклянной трубкой

Головки стянуты одна с другой несколькими тягами 4, образующими вместе с поперечными тягами 5 защитную решетку вокруг стеклянной трубки.

Внутри трубки 3 свободно перемещается поплавок 2, имеющий форму волчка. В нижней головке находится седло, на которое опускается поплавок при прекращении потока. Верхняя головка снабжена ограничителем хода поплавка. Седло и ограничитель хода не позволяют поплавку выйти за пределы стеклянной трубки. Шкала 7 прибора вытравлена на самой стеклянной трубке, отсчет ведут по верхней горизонтальной плоскости поплавка.

В верхней части поплавка часто делают косые прорезы, которые позволяют поплавку вращаться вокруг вертикальной оси.

При вращении поплавков центрируется внутри трубки, не соприкасаясь со стенками, его чувствительность повышается. Ротаметры со стеклянной трубкой изготавливают на давление, не превышающее 600 кПа. При более высоком давлении измеряемой среды, а также для измерения расхода пара применяют ротаметры с металлической трубкой.

Во взрывоопасных и пожароопасных условиях для измерения расхода применяют ротаметры с пневматической дистанционной передачей (рис. 4.21).

Прибор состоит из двух основных частей: собственно ротаметра и механизма пневматической дистанционной передачи.

Собственно ротаметр имеет конический поплавок 1, диафрагму 2 и цилиндрическую металлическую трубку 3 из стали X18H9T. Имеются модели ротаметров с поплавком, перемещающимся внутри конусной трубки. На штоке 4 закреплены два цилиндрических постоянных магнита 5, обращенные один к другому одноименными полюсами.

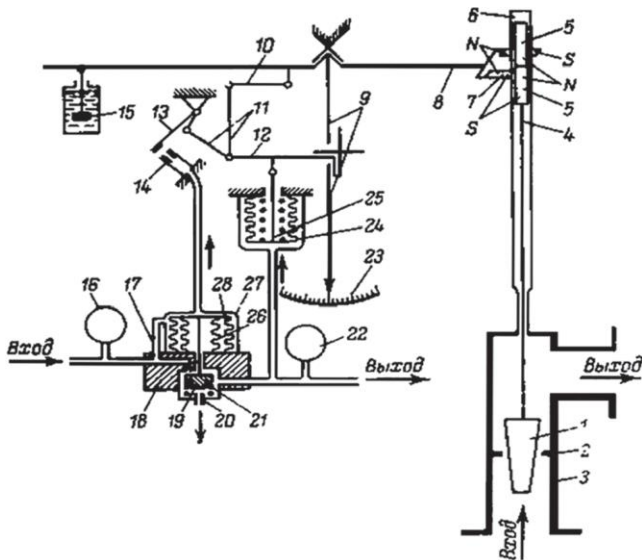


Рис. 4.21. Ротаметр с пневматической дистанционной передачей:

- 1 — поплавок; 2 — диафрагма; 3 — цилиндрическая металлическая трубка; 4, 25 — штоки; 5 — внутренние магниты;
- 6 — трубка из немагнитного материала; 7 — наружные магниты;
- 8, 12 — рычаги; 9 — стрелка; 10 — тяга; 11 — угловой рычаг;
- 13, 19 — челноки; 14 — сопло; 15 — демпфер; 16, 22 — манометры;
- 17 — дроссель постоянного сечения; 20 — выходное сопло; 21 — камера;
- 23 — шкала; 24, 26, 28 — сильфоны

Магниты перемещаются вместе с поплавком внутри трубки 6, выполненной из немагнитного материала. Снаружи трубку 6 охватывает вилка, составленная из двух плоских укрепленных на рычаге 8 магнитов 7. Перемещение поплавка через магнитную муфту, образованную внутренними магнитами 5 и наружными магнитами 7, и рычаг 8 передается стрелке 9, показывающей величину расхода на шкале 23.

Механизм пневматической дистанционной передачи состоит из пневмопреобразователя, работающего по принципу компенсации перемещений, и пневмореле. Ротаметры этого типа изготавливают на рабочее давление 6,4 МПа; основная погрешность не превышает 3 % от максимального деления шкалы.



Универсальное исполнение данного прибора позволяет использовать различные типы присоединений в соответствии с различными стандартами. Стекланный измерительный конус, защищенный металлическим рукавом со смотровым стеклом, позволяет напрямую снимать показания расхода и наблюдать за средой.

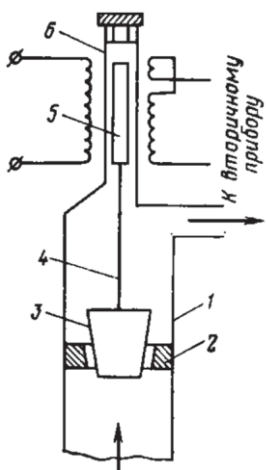
Данный прибор подходит для измерения расхода газов в соответствии с DVGW G260, что подтверждается сертификатом испытательной станции DVGW Института по исследованию газовых отопительных систем в г. Эссене.

*Рис. 4.22. Ротаметр  
в стеклянном корпусе  
VA 40*

*Характеристики прибора:*

- простой и дешевый принцип измерения: измерение расхода и отображение результатов не требует вспомогательного источника питания;
- аналоговый сигнал 4–20 мА, используемый для записи или управления;
- соединения из нержавеющей стали (остальные материалы — опционально);

- резьбовое, шланговое, фланцевое, клеммное соединения;
- температура процесса от  $-20$  до  $+100$  °С;
- рабочее давление до 7/10 бар (в зависимости от DN);
- верхний предел измерения для жидкостей — от 0,4 до 10 000 л/ч (вода — 20 °С);
- верхний предел измерения для газов — от 7 до 310 000 л/ч (воздух — 20 °С, 1,013 бар);
- 2 предельных переключателя;
- погрешность 1,0 % от измеренного значения в соответствии с VDI/VDE 3513-2 ( $qG = 50$  %);
- применение во взрывоопасных зонах (ATEX);
- специальное исполнение для пищевой и фармацевтической промышленности;
- гладкая поверхность из нержавеющей стали;
- детали, контактирующие со средой, имеют параметр шероховатости  $< 0,8$  мкм, благодаря чему на них практически не образуются отложения и они легко очищаются.



*Рис. 4.23. Ротаметр с дифференциально-трансформаторным преобразователем*

На рис. 4.23 приведена принципиальная схема ротаметра с электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний на расстояние. Измерительная часть прибора изготовлена в виде металлического цилиндра 1, в который помещена диафрагма 2. Внутри диафрагмы перемещается конусный поплавок 3, жестко соединенный со штоком 4; на верхнем конце штока укреплен сердечник 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя. Сердечник находится внутри разделительной трубки 6, на которую надета катушка преобразователя. Бесшкальные ротаметры работают в комплекте с вторичными дифференциально-трансформаторными приборами.



Ротаметры с электрической дифференциально-трансформаторной системой изготавливают на рабочее давление 6,2 МПа. Основная погрешность комплекта (преобразователя и вторичного прибора) составляет 3 % от верхнего предела измерения.



Рис. 4.24. Ротаметр  
H250 M40

Представляет собой стандартный ротаметр для технологических процессов и сектора производства изделий для изготовителей комплектного оборудования. В ротаметре измерение расхода жидкостей и газов механическим методом сочетается с высокотехнологичными коммуникационными возможностями. Модульная концепция прибора предполагает возможность дооснащения. Возможно дооснащение дополнительными модулями электроники или их замена в любое время без прерывания технологического процесса. Таким образом, его функциональное наполнение адаптируется к новым требованиям: от аналогового измерения расхода без дополнительного электропитания до цифровой интеграции в шинную систему.

Прибор H250 M40 изготавливается из различных материалов и доступен в разнообразных версиях. Прочный цельнометаллический расходомер может также применяться в условиях высокого давления (до 1000 бар изб. / 14500 фунт/кв. дюйм изб.), высоких температур (от  $-196$  до  $+400$  °C / от  $-320$  до  $+752$  °F) или для агрессивных рабочих сред. Он даже позволяет осуществлять монтаж на горизонтальных или нисходящих трубопроводах диаметром до DN150/6". Также доступна специальная версия для использования в гигиенических применениях. Прибор выполнен в искробезопасном и взрывозащищенном исполнении. Некоторые версии расходомера с предельным выключателем или аналоговым выходным сигналом подходят для использования в автоматизированных системах безопасности.

*Отличительные особенности прибора:*

- простой и экономически эффективный монтаж, возможность измерения и индикации без дополнительного источника питания;
- уникальная модульная концепция и удобство обслуживания: предельные выключатели, двухпроводная технология

- 4–20 мА, сумматор с ЖК-дисплеем и импульсным выходом, промышленные протоколы связи;
- универсальная концепция взрывозащиты: взрывонепроницаемость и искробезопасность;
- различные материалы изготовления первичного преобразователя: нержавеющая сталь и сплавы;
- опционально доступный корпус из нержавеющей стали для коррозионно-активных сред;
- степень пылевлагозащиты IP66 и IP68 / NEMA4X и NEMA6, опционально IP69K;
- верхний предел измерений для жидкостей  
10–120 000 л/ч / 5–32 000 гал/ч;
- верхний предел измерений для газов  
0,7–2 800 м<sup>3</sup>/ч / 25–100 000 станд. куб. фут/ч
- динамический диапазон регулирования 10:1 (опционально 100:1);
- погрешность  $\pm 1,6$  %;
- подходит для использования в автоматизированных системах безопасности;
- доступно гигиеническое исполнение для применения в пищевой и фармацевтической промышленности.

*Типичные сферы применения прибора:*

- химическая и иные перерабатывающие отрасли промышленности;
- работа с присадками (например, катализаторы, ПАВ, ингибиторы пенообразования, эмульгаторы);
- работа с кислотами, щелочами, фосгеном и иными хлорсодержащими и серосодержащими веществами;
- работа с конденсатом и охлаждающей водой;
- инертизация азотом резервуаров и емкостей;
- выборочный контроль расхода для анализа технологического процесса;
- барботирование газа в жидкостях;
- нефтегазовая промышленность.

## § 4.6. Прочие расходомеры

**Электромагнитные расходомеры.** Эти расходомеры подразделяются на приборы с электромагнитным преобразователем расхода и приборы с электромагнитными преобразователями скорости потока.

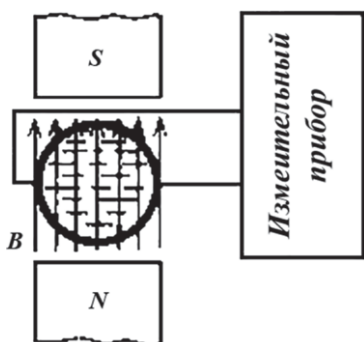


Рис. 4.25. Электромагнитный расходомер

Приборы с электромагнитным преобразователем расхода основаны на взаимодействии движущейся жидкости с магнитным полем. Это взаимодействие подчиняется закону Фарадея, согласно которому в жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера показана на рис. 4.25. Трубопровод с перемещающейся в нем жидкостью помещен в магнитное поле. Трубопровод изготовляют из изоляционного материала: для этой цели используют фторопласт, эбонит, резину и другие материалы в зависимости от свойств измеряемой жидкости.

Известно, что в движущемся проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля, индуцируется электродвижущая сила, величина которой определяется по формуле

$$E = B l v, \quad (4.36)$$

где  $E$  — индуцируемая в проводнике ЭДС;

$B$  — магнитная индукция;

$l$  — длина проводника;

$v$  — скорость движения проводника.

В случае измерения расхода жидкости можно записать

$$E = B d v_{cp}, \quad (4.37)$$

где  $d$  — внутренний диаметр трубопровода;

$v_{cp}$  — средняя скорость протекания жидкости через поперечное сечение трубы в зоне, индуктируемой ЭДС.

Следовательно, электромагнитный расходомер является по существу генератором, в котором проводником, перемещающимся в магнитное поле, служит электропроводная жидкость. Проводимость жидкости должна быть не ниже  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  См, что соответствует проводимости водопроводной воды.

В стенки трубопровода диаметрально противоположно в одном поперечном сечении введены электроды (заподлицо с внутренним диаметром трубы). К электродам подключают какой-либо высокочувствительный измерительный прибор, шкала которого градуирована в единицах скорости или единицах расхода. Измерительный прибор выбирают с большим входным сопротивлением в соответствии с неравенством

$$Z_{вх} \gg Z_{ж},$$

где  $Z_{вх}$  — входное сопротивление измерительного прибора;

$Z_{ж}$  — сопротивление жидкости между электродами.

Практически независимость показаний расходомера от плотности, температуры и электропроводности жидкости определяется выбранной величиной отношения  $Z_{вх} / Z_{ж}$ . Чем больше это отношение, тем выше точность расходомера в большом интервале измерения температуры, плотности, вязкости и электропроводности жидкости. Расход  $Q$  определяется по формуле

$$Q = F \times v, \quad (4.38)$$

где  $F$  — поперечное сечение трубы.

В качестве измерительного прибора можно использовать потенциометры или милливольтметры.

Комплект общепромышленного электромагнитного расходомера (ЭМР) состоит из преобразователя расхода и измерительного блока. Конструктивно преобразователь включает два узла — трубу и электромагнит. Преобразователь содержит также контур для подавления трансформаторной ЭДС.

Электромагнитные расходомеры имеют ряд преимуществ. Прежде всего, они практически безынерционны, что очень важно при измерении быстроизменяющихся расходов и при использовании их в системах автоматического регулирования. Результат измерения не зависит от наличия взвешенных частиц в жидкости и пузырьков газа. Показания расходомера не зависят от свойств измеряемой жидкости (вязкости, плотности) и от характера потока (ламинарный, турбулентный).

Вследствие линейной зависимости возникающей ЭДС от расхода шкала вторичного прибора линейна. Электромагнитные расходомеры обеспечивают измерение расхода в интервале  $1\text{--}2\ 500\ \text{м}^3/\text{ч}$  и более при трубопроводах с внутренним диаметром от 10 до 300 мм при линейной скорости движения жидкости ( $v_{cp}$ ) от 0,6 до 10 м/с.

Промышленность выпускает ЭМР с различными электромагнитными полями возбуждения. Расходомеры типов ИР-51, ИР-51А, 4-РИМ, 5-РИМ имеют равномерное магнитное поле возбуждения. Это обеспечивает независимость показаний от профиля распределения скорости при асимметричном потоке. Расходомеры типов «Индукция-51» и «Индукция-М» имеют неоднородное магнитное поле возбуждения. Основная погрешность, считаемая от верхнего предела измерения по токовому выходному сигналу расходомеров типов ИР-51, ИР-51А, «Индукция-51» (с  $D_u$  до 300 мм), равна  $\pm 1\ \%$ .



*Рис. 4.26. Электро-  
магнитный расходомер  
Tidalflux 2300 C  
для измерения расхода  
в частично-заполненных  
трубопроводах*

Электромагнитный расходомер Tidalflux с встроенной бесконтактной системой измерения уровня обеспечивает точность измерения расхода в частично заполненных трубах.

Tidalflux обеспечивает надежность измерений при заполнении поперечного сечения трубы от 10 до 100 %. Вмонтированные в трубу датчики уровня не входят в контакт с жидкостью и поэтому нечувствительны к жиру или маслу, находящимся на поверхности.

Прибор применяется для частично заполненных труб при измерении расхода стоков, ливневых стоков, фекальных и химических стоков. Может применяться для трубопроводов до DN1600/64".

*Преимущества прибора:*

- высокая износостойкость и устойчивость к химическому воздействию;
- измерения возможны при заполнении измерительной трубы от 10 до 100 %;
- бесконтактная система контроля уровня заполнения измерительной трубы, нечувствительная к загрязнениям;
- измерительные электроды располагаются ниже 10 % уровня заполнения, поэтому загрязнение становится маловероятным;
- прибор не требует калибровки по месту эксплуатации.

*Технические характеристики:*

- погрешность от  $\pm 1$  %;
- условный диаметр 200–1800 мм;
- футеровка из полиуретана;
- электроды «Хастеллой» C22, нержавеющая сталь;
- температура среды от  $-5$  до  $+60$  °C;
- выходные сигналы: токовый, импульсный, состояния, HART®, FF, Profibus PA, DP, Modbus.

*Области применения прибора:*

- в качестве замены дорогих конструкций с сифонными трубами для частично заполненных труб;
- работы на объектах водопользования, при обработке сточных и поверхностных вод;
- работа с биологическими и химическими сточными водами.

**Турбинные расходомеры.** Турбинный расходомер — счетчик газа «Тургас», предназначен для измерения объемного расхода и учета объемного количества природного горючего газа (метана). Он основан на принципе вращения натекающим потоком газа измерительной крыльчатки. Угловая скорость крыльчатки преобразуется в электрические импульсные сигналы, частота следования которых пропорциональна объемному расходу.

Комплект расходомера счетчика «Тургас» состоит из турбинного преобразователя (датчика) объемного расхода ПРГ и электронного блока измерения.

Ряд приборов включает пять типоразмеров преобразователей по пределам измерения: ПРГ-100, ПРГ-200, ПРГ-400, ПРГ-800 и ПРГ-1600. Конструкция преобразователя типа ПРГ-400 показана на рис. 4.27.

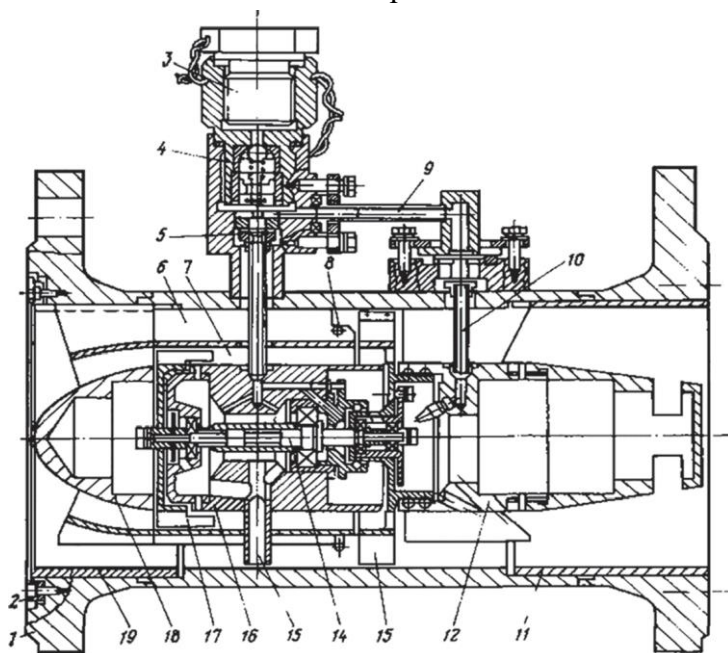


Рис. 4.27. Преобразователь-счетчик «Тургас»  
(пояснения в тексте)

Преобразователь расхода представляет собой цилиндрический корпус 1 с фланцами, в проточной части которого последовательно по потоку расположены передний направляющий аппарат 18 и опора 16, внутри которой проходит вал 14 с двумя парами подшипников. На каждой паре вращаются измерительная и приводная винтовые крыльчатки 13 и 17. Далее установлен задний направляющий аппарат 12. Втулка 11 к 19 служат для стягивания в осевом направлении узлов к деталям проточной части ПРГ. Проточная часть разделена на два тракта: основной канал 6, в котором вращается измерительная крыльчатка, и концентрично основному байпасный канал 7, в котором расположена приводная крыльчатка.

Система труб 5, 9, 10 вместе с впускным штуцером 4 служит для подачи масла к подшипникам, для этого вместо пробки 3 на период смазки устанавливают масленку. Во входной части корпуса ПРГ находится металлическая сетка 2. Измерительная крыльчатка 13 расположена в зоне магнитоиндукционного преобразователя (расположен на корпусе ПРГ) и является чувствительным элементом при преобразовании скорости потока газа в электрические импульсы. Приводная крыльчатка 17 расположена в байпасном канале и служит для вращения вала 14, с которым она жестко связана.

На радиально расположенных лопастях опоры 16 перед крыльчаткой 13 установлено кольцо 8, которое выполняет функции элемента, улучшающего при его обтекании газовой средой характеристику прибора, что обусловлено воздействием определенным образом кольца 8 на вращение крыльчатки 13. Трубка 15 служит для сбора и слива излишков масла из зоны подшипников.

Средний ресурс расходомера-счетчика не менее 10 000 ч. Вероятность безотказной работы за 2 000 ч. составляет 0,95.



**Ультразвуковые расходомеры.** Эти расходомеры основаны на смещении ультразвуковых колебаний движущейся жидкостью.

В трубопроводе установлены два источника и два приемника ультразвуковых колебаний частотой 1–3 МГц. Если жидкость в трубопроводе неподвижна, то при скорости ультразвука  $c$  длительность прохождения импульса равна

$$t = l \times c, \quad (4.42)$$

где  $l$  — расстояние между излучателями и приемниками ультразвука.

При перемещении жидкости со скоростью  $v$  время прохождения ультразвука по направлению потока  $t_1$  и навстречу ему  $t_2$  составит

$$t_1 = l_1 (c + v); \quad t_2 = l_2 (c - v),$$

откуда

$$\Delta t_1 - t_2 = 2lv / c_2. \quad (4.43)$$

Эта разность времени прохождения импульсов по потоку и против потока является мерой расхода.

Приборы данного типа применяют для измерения расхода пульп при малых диаметрах трубопроводов (от 10 мм) и скоростях потоков не менее 0,02 м/с.



Рис. 4.28. Ультразвуковой расходомер-счетчик РУС-1

Счетчик предназначен для измерения расхода питьевой воды, горячего и холодного водоснабжения, теплофикационной воды, сточных вод, нефтепродуктов и других жидкостей, протекающих по одной (двум) металлическим напорным, полностью заполненным трубопроводам.

Ультразвуковой расходомер РУС-1 работает от сети переменного напряжения 220 В. Используется для измерения расхода холодной и горячей воды, стоков, других жидких сред, в том числе для технологического учета нефтепродуктов.

Максимальный диаметр трубопровода — 1 800 мм. Прибор может поставляться как вместе с УПР (отрезком трубы с установленными датчиками), так и в беструбном варианте (электронный блок с датчиками) для самостоятельной врезки в действующий трубопровод. При этом необходимо иметь соответствующие приспособления — монтажные комплекты типа ПР.

Эта модель расходомера отличается простотой настройки, минимумом необходимых опций. Обычно используется как самостоятельный прибор для измерения расхода, например, на магистральных трубопроводах хозяйственно-питьевой воды или в составе теплосчетчиков.

Электронный блок расходомера отображает на индикаторе мгновенный потребляемый расход, накопленный объем за все время работы, время работы в нормальном режиме. Выходные сигналы: частотно-импульсный 0–1000 (0–125; 0–4) Гц, опционально — токовый выход 4–20 (0–20; 0–5) мА.

Расходомер РУС-1 может обслуживать до двух трубопроводов, производится в раздельном исполнении, электронный блок может установлен в помещении оператора за 200 метров от первичного преобразователя (УПР).

## ТЕМА 5

### **Контроль уровня жидкостей и сыпучих материалов**

Измерение уровня жидкостей и сыпучих тел относится к числу вспомогательных контрольных операций, позволяющих определять количество жидкости или сыпучего тела в хранилище для учета продукта и сигнализации о переполнении расходных баков и бункеров. Приборы, предназначенные для этой цели, называются *уровнемерами широкого диапазона*. Эти приборы имеют шкалу с нулем в начале и делениями, идущими от нуля в одну сторону. Единицы измерения — сантиметры, дециметры и метры.

Кроме того, измерение уровня необходимо для поддержания его на заданной высоте. В этом случае приборы показывают величину отклонения уровня от нормального положения и называются *уровнемерами узкого диапазона*. Шкала прибора имеет нуль посередине и деления, идущие в обе стороны от нуля. Пределы измерений обычно составляют от  $\pm 100$  до  $\pm 150$  мм. Единицы измерения в узком диапазоне — сантиметры и миллиметры.

#### **§ 5.1. Измерение уровня жидкости**

Устройства для измерения уровня жидкости можно подразделить на следующие:

- 1) визуальные;
- 2) поплавковые, в которых для измерения уровня используется поплавки или другое тело, находящееся на поверхности жидкости;
- 3) гидростатические, основанные на принципе сообщающихся сосудов со средами одинаковой или различной плотности по сравнению с плотностью измеряемой среды;

- 4) электрические, в которых величины электрических параметров зависят от уровня жидкости;
- 5) ультразвуковые, основанные на принципе отражения звуковых волн;
- 6) радиоизотопные, основанные на использовании интенсивности потока ядерных излучений, зависящих от уровня жидкости.

**Визуальные уровнемеры.** Простейшим измерителем уровня жидкости служат указательные стекла (рис. 5.1).

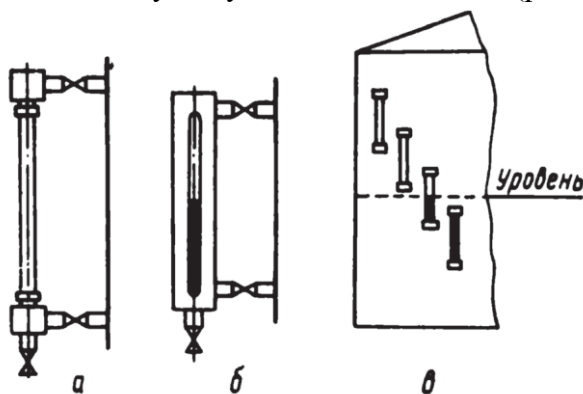


Рис. 5.1. Указательные стекла:

*а — проходящего света; б — отражательного света;  
в — несколько указательных стекол на высоких резервуарах*

Работа указательных стекол основана на принципе сообщающихся сосудов. Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разрежением). Наблюдая за положением уровня жидкости в стеклянной трубке можно судить об изменении уровня в сосуде.

Указательные стекла снабжают вентилями или кранами для отключения их от сосуда и продувки системы. В арматуру указательных стекол сосудов, работающих под давлением, обычно вводят предохранительные устройства, автоматически закрывающие каналы в головках при случайной

поломке стекла. Плоские указательные стекла рассчитаны на давление до 2,94 МПа и температуру до 300 °С.

Указательные стекла не рекомендуется употреблять длиной более 0,5 м, поэтому при контроле уровня, изменяющегося больше чем на 0,5 м, устанавливают несколько стекол (рис. 5.1, в) так, чтобы верх предыдущего стекла перекрывал низ последующего.

**Поплавковые уровнемеры.** Чувствительным элементом поплавкового измерителя уровня является поплавок 1, плавающий на поверхности жидкости (рис. 5.2). Поплавок уравнивается грузом 2, который связан с поплавком гибким тросом 3. Положение груза относительно шкалы определяет уровень жидкости. Пределы измерения устанавливают в соответствии с принятыми значениями верхнего 4 и нижнего 5 уровней.

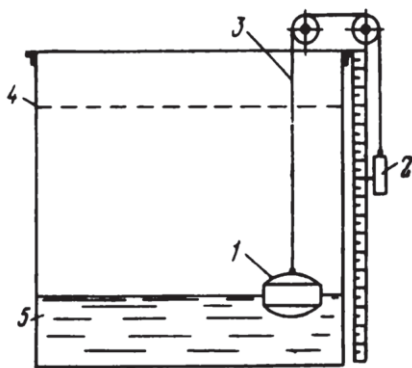


Рис. 5.2. Поплавковый уровнемер

Работа поплавкового электрического уровнемера типа ДПЭ (рис. 5.3) основана на изменении положения поплавка, связанного с постоянным магнитом, при изменении уровня жидкости. Магниты, ориентированные одноименными полюсами один относительно другого, обеспечивают при перемещении поплавка управление контактными

устройствами через герметичную стенку. При достижении жидкостью верхнего предельного положения нормально замкнутый контакт размыкается, а нормально разомкнутый замыкается.

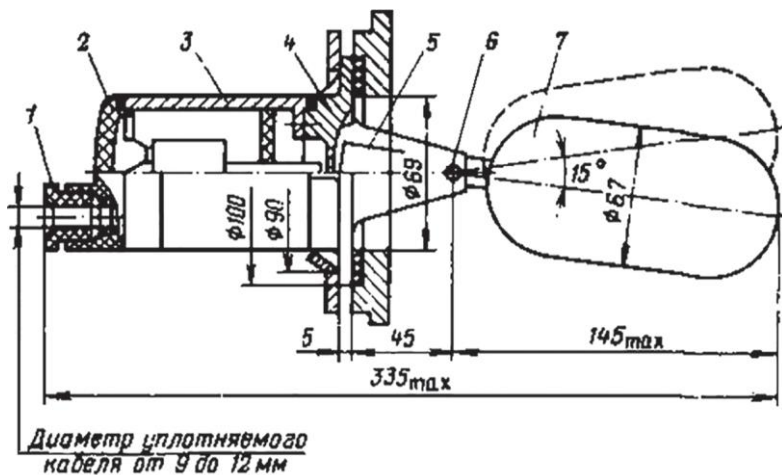


Рис. 5.3. Поплавковый электрический уровнемер типа ДПЭ-1

Уровнемеры этого типа выпускаются трех модификаций. Первичный преобразователь уровнемера типа ДПЭ-1 состоит из поплавка 7 и магнита 5, закрепленного на оси 6 кронштейна 4, размещенного в литом алюминиевом корпусе 3. На изолированной крышке 2, крепящийся винтами к корпусу датчика, расположен переключатель. В крышке предусмотрено сальниковое уплотнение 1 для закрепления кабеля.

Уровнемеры ДПЭ имеют погрешность срабатывания  $\pm 3$  мм. Основной эксплуатационный недостаток поплавков — возможность коррозии и протравления тонких стенок поплавка, приводящих к его потоплению. Это ограничивает область применения поплавковых измерителей уровня.



Уровнемеры поплавковые предназначены для измерения уровня нефтепродуктов и других жидкостей, хранящихся в цилиндрических, сферических и других резервуарах (емкостях), находящихся под атмосферным или избыточным давлением. Уровнемеры поплавковые обеспечивают измерение уровня жидкости в наземных или заглубленных емкостях, находящихся в помещении или на открытом воздухе.

Конструкция уровнемеров поплавковых обеспечивает достоверность измерений при наличии пены в емкостях.

*Рис. 5.4. Уровнемеры поплавковые УПП, УПТ*

#### *Технические характеристики поплавковых уровнемеров*

- допустимая рабочая среда — жидкости, не агрессивные к стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72, не содержащие ферромагнитных включений, не относящиеся к коксующимся, полимеризующимся, а также не обладающие адгезией с поверхностями поплавка и разделительной трубы;
- температура рабочей среды — от  $-40$  до  $+100$  °С;
- плотность рабочей среды от  $400$  до  $1800$  кг/м<sup>3</sup>;
- значение условного давления рабочей среды до  $1,6$  МПа;
- кинематическая вязкость рабочей среды до  $1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с;
- скорость изменения измеряемого уровня до  $8,3 \cdot 10^{-3}$  м/с;
- присоединение к емкости производится с помощью монтажного фланца DN 50 на PN 25 и конфигурацией 2 по ГОСТ 12815–80.

Значительно более надежны тонущие поплавки — массовые буйки 1 (рис. 5.5). При изменении уровня жидкости изменяется по закону Архимеда действующая на конец рычага 2 сила (вес буйка) и соответственно изменяется момент сил, действующих на рычаг. Изменяющийся при колебаниях уровня момент сил от буйка 1 передается через вал 5, закрепленный в доньшке 6, на трубку 4 и уравнивается моментом ее скручивания.

Изменение угла скручивания трубки, пропорциональное величине уровня, очень невелико. Поэтому обычно используют усилители 2, чаще пневматические, соединяемые с доньшком 6 рычагом 3. Длина буйка 1 зависит от установленных значений верхнего ВУ и нижнего НУ уровней.

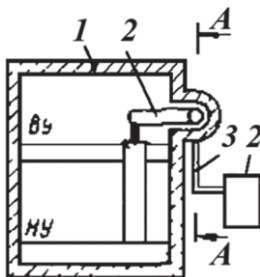


Рис. 5.5. Тонуций бую

Принципиальная схема уровнемера буюкового пневматического типа УБ-П показана на рис. 5.6.

Уровень предназначен для непрерывного преобразования уровня жидкости, находящейся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, в пневматический сигнал дистанционной передачи. Он состоит из унифицированного пневмосилового преобразователя и измерительного блока.

Буюковые измерители уровня используют чаще всего как устройства информации в системах автоматического регулирования, защиты и сигнализации.

Интервал измерения уровня поплавковых и буюковых уровнемеров выбирают из ряда: от 0 до 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 16,0 и 20 м. Класс точности может быть 0,6; 1,0; 1,6 и 2,5. Для учетно-расчетных операций уровнемеры изготавливают с основными погрешностями от  $\pm 1,0$  до 10,0 мм (ГОСТ 8.321–2013).



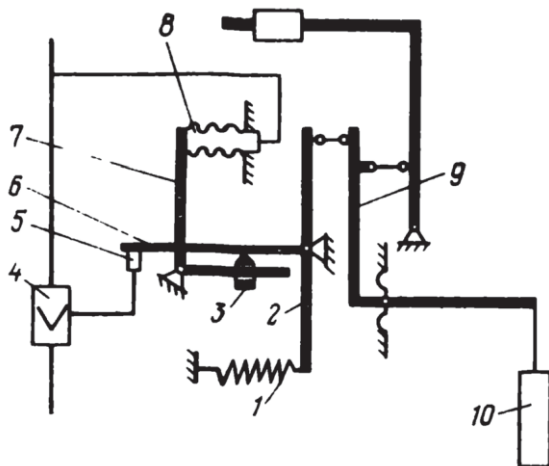
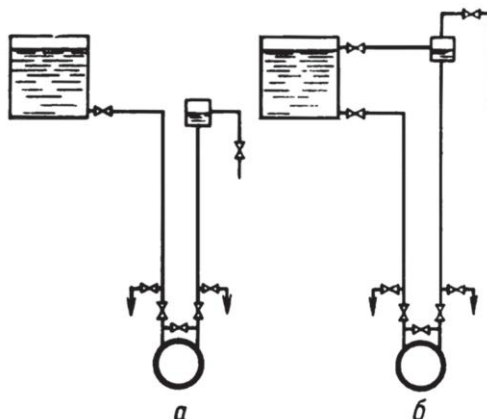


Рис. 5.6. Уровнемер буйкового типа УБ-П:

- 1 — пружина корректора нуля; 2 — Т-образный рычаг;  
 Т — подвижная опора; 4 — пневмореле; 5 — сопло; 6 — заслонка;  
 7 — Т-образный рычаг; 8 — сиффон обратной связи; 9 — рычаг;  
 10 — чувствительный элемент

Измерительный блок датчика представляет собой рычажную систему с чувствительным элементом в виде буйка 10. Бук подвешен к рычагу 9 вывода через призму. Вывод рычага 9 из полости рабочего давления уплотнен одной гофрированной металлической мембраной. Начальный вес буйка уравнивается специальным грузом, навинченным на плече дополнительного рычага. Основание имеет фланец, который служит для крепления датчика к объекту.

**Гидростатические уровнемеры.** К простейшим гидростатическим измерителям уровня жидкости относятся дифференциальные манометры. Дифанометром можно измерять уровень в открытых и закрытых сосудах, т. е. в сосудах, находящихся под давлением и разрежением. На рис. 5.7 показана схема трубных соединений при измерении уровня в открытом резервуаре и установка дифанометра ниже его дна.



*Рис. 5.7. Схема трубных соединений с размещением дифманометра ниже дна резервуара:*

- а — при измерении уровня жидкости в открытом резервуаре;  
 б — то же в резервуаре, находящемся под давлением*

При применении дифманометров для измерения уровня обязательно устанавливают уравнительный сосуд, наполненный до определенного уровня той же жидкостью, что находится в резервуаре. Назначение уравнительного сосуда — обеспечение постоянного столба жидкости в одном из колен дифманометра. Высота столба жидкости во втором колене дифманометра изменяется с изменением уровня в резервуаре. Каждому значению уровня в резервуаре соответствует определенный перепад давления, показываемый дифманометром, что позволяет судить о положении уровня.



*Рис. 5.8. Гидростатический  
уровнемер Endress + Hauser  
Deltapilot S FMB70*

Датчик гидростатического давления (гидростатический уровнемер используется для следующих измерений:

- измерение гидростатического давления в жидких и пастообразных средах для любых инженерно-конструкторских задач и приложений технологии измерений, в частности в фармацевтической и пищевой промышленности.
- измерение уровня, объема или массы жидкостей.

*Особенности гидростатического уровнемера Endress + Hauser Deltapilot S FMB70*

- отличная воспроизводимость и долговременная стабильность;
- герметичная измерительная ячейка CONTITE™, обеспечивающая защиту от воздействия конденсата и влияния климатических условий;
- высокая степень линейности (менее 0,1 % установленного диапазона измерений);
- высокая базовая точность:  $\pm 0,1$  %;
- минимальное влияние температуры (менее 0,1 % на 10 K);
- модуль памяти HistoROM®/M-DAT;
- функциональный мониторинг всех компонентов, от измерительной ячейки до электронного блока;
- оперативный ввод в эксплуатацию благодаря встроенному меню быстрой настройки;
- удобство и безопасность эксплуатации на объекте с помощью меню, с использованием протоколов HART (сигнал 4–20 мА), PROFIBUS PA или FOUNDATION Fieldbus;
- расширенные функции диагностики.

**Пьезометрические уровнемеры.** Они основаны на принципе гидравлического затвора.

Для измерения уровня (рис. 5.9) используют воздух или инертный газ под давлением, который продувают через

слой жидкости. Количество продуваемого воздуха ограничивают диафрагмой  $D$  или иным способом так, чтобы скорость движения его в трубопроводе была минимально возможной. Это приближает к нулю потери на трение в трубопроводе после диафрагмы  $D$ .

Уровень жидкости определяется по установившемуся давлению  $(P - P_x)$  в системе:

$$P - P_x = H_{pж} q,$$

откуда

$$H = (P - P_x) / \rho_{ж} q. \quad (5.1)$$

Давление  $(P - P_x)$  определяется по высоте  $h$  столба жидкостного манометра с замыкающей жидкостью плотностью  $\rho_{ж}$  или любым иным способом. В случае измерения уровня в сосудах, заполненных агрессивными жидкостями и газами (рис. 5.9), обязателен непрерывный подвод воздуха или инертного газа в обе линии, подсоединяемые к дифференциальному манометру. Для наблюдения за непрерывностью на каждой линии устанавливают стеклянные контрольные сосуды КС с водяным затвором, по которому видно движение воздуха, или ротаметры.

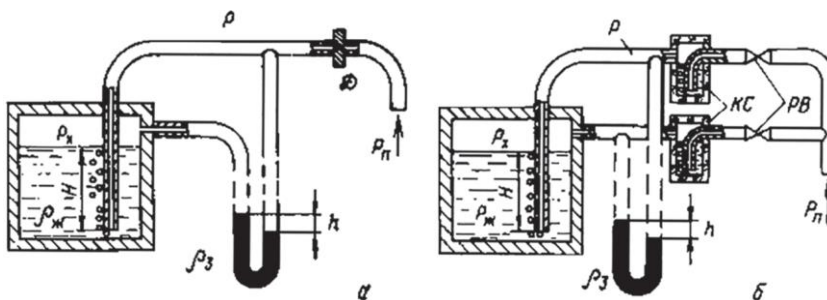


Рис. 5.9. Схема пьезометрического измерения уровня:  
а — неагрессивной жидкости под давлением;  
б — агрессивной жидкости под давлением

Количество подводимого воздуха устанавливают регулируемыми вентилями РВ.

Пьезометрические уровнемеры находят широкое применение для измерения уровня в подземных резервуарах.

**Электрические уровнемеры.** В электрических уровнемерах уровень жидкости преобразуется в электрический сигнал. Наиболее распространены емкостные и омические уровнемеры.

Работа емкостных уровнемеров основана на том, что диэлектрическая проницаемость водных растворов солей, кислот и щелочей отличается от диэлектрической проницаемости воздуха либо водных паров.

Принципиальная схема емкостного уровнемера показана на рис. 5.10. В сосуд с жидкостью 1, уровень которой необходимо измерить, опущен электрод 2, покрытый изоляционным материалом. Электрод вместе со стенками сосуда образует цилиндрический конденсатор, емкость которого изменяется при колебаниях уровня жидкости. Величина емкости измеряется электронным блоком 3, который дает сигнал в блок 4, представляющий собой релейный элемент (в схемах сигнализации достижения определенного уровня) или указывающий прибор (в схемах измерения уровня).

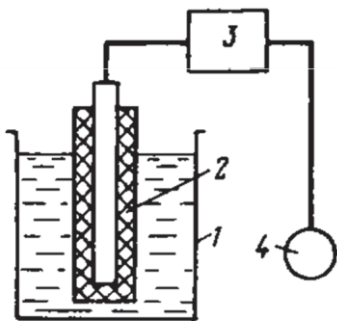


Рис. 5.10. Схема измерения емкостными уровнемерами

Принцип действия омических сигнализаторов основан на замыкании электрической цепи источника питания через контролируемую среду, представляющую собой участок электрической цепи, обладающей определенным омическим сопротивлением (растворы кислот и щелочей). Практически омические сигнализаторы уровня могут быть применены для сред с проводимостью от  $2 \cdot 10^{-3}$  См и выше.

Прибор представляет собой электромагнитное реле, которое включается в цепь, образующуюся между электродом и контролируемым материалом. Схемы включения релейного сигнализатора уровня (рис. 5.11) могут быть различны в зависимости от типа объекта и числа контролируемых уровней.

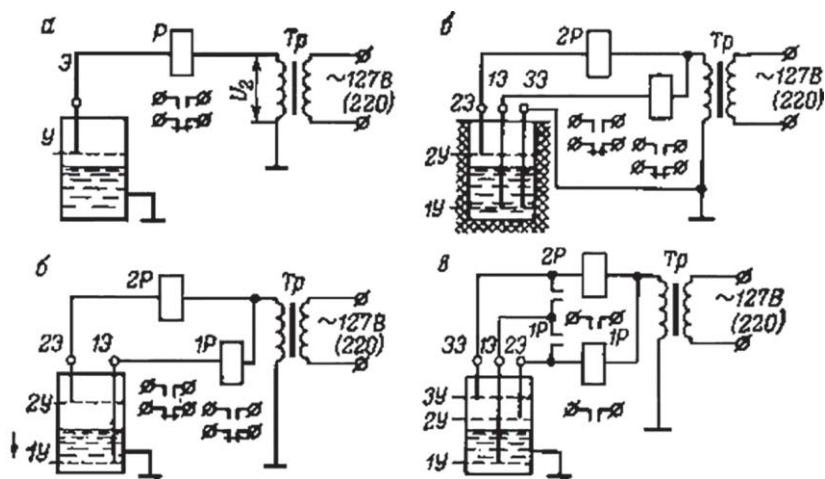


Рис. 5.11. Схемы включения омического релейного сигнализатора уровня:

- а — для контроля одного уровня; б — для контроля двух уровней;  
в — для контроля двух уровней и емкости из изоляционного материала;  
г — для контроля трех уровней



Kotron 805 – двухпроводной уровнемер с питанием по токовой петле. При изменении уровня жидкости в резервуаре происходит изменение электрической емкости, которая преобразуется уровнемером в унифицированный электрический сигнал 4–20 мА.

Уровнемер Kotron 805 сочетает испытанную технологию измерения электрической емкости с передовыми способами обработки сигнала и удобством работы для пользователя. При повышении и понижении уровня жидкости в резервуаре электрическая емкость, создаваемая между чувствительным элементом и стенкой резервуара (или землей), также повышается и понижается. Это изменение емкости преобразуется в цифровой сигнал для вывода на дисплей и передачи по HART, а также в налоговый выходной сигнал 4–20 мА.

*Рис. 5.12. Уровнемер емкостный Kotron 805*

#### *Технические характеристики прибора Kotron 805*

- выходной сигнал 4–20 мА, HART;
- температура процесса от –196 до +540 °С;
- давление процесса до 345 бар;
- погрешность измерений  $\pm 0,5$  %;
- диапазон измерений до 45 м;
- взрывозащита: вида ExiaIICT6;
- прибор аттестован на использование в цепях надежности класса SIL 1/2 и SIL 2/3.

#### *Применение прибора Kotron 805*

- среда: проводящие и непроводящие жидкости;
- сосуды: большинство технологических сосудов или складских резервуаров, температура и давление в которых соответствуют характеристикам устройства;
- условия: все применения, требующие измерения уровня и управления им, при наличии пара, пены, турбулентной поверхности, пузырьков и кипения, при высокой скорости заполнения и опорожнения, а также при низких уровнях.

**Радиоизотопные уровнемеры.** Уровнемеры с радиоизотопными излучателями делятся на две группы:

- 1) со следящей системой, для непрерывного измерения уровня;
- 2) сигнализаторы (индикаторы) отклонения уровня от заданного значения.

Принципиальная схема следящего уровнемера типа УР приведена на рис. 5.13. Действие прибора основано на сравнении интенсивностей потоков  $\gamma$ -лучей, проходящих выше или ниже уровня раздела двух сред разной плотности. Комплект прибора состоит из трех блоков:

- 1) преобразователя, содержащего источник и приемник излучения;
- 2) электронного блока;
- 3) показывающего прибора.

Преобразователь на фланцах 4 присоединен к вертикальным трубкам 2, установленным внутри объекта измерения. Расположенный в герметичном корпусе преобразователя реверсивный двигатель 6 через червячную передачу 7 вращает барабан 5, на котором укреплен стальная лента 3. На концах ленты свободно висят источник излучения 1 и приемник излучения 13. Электрический сигнал от приемника излучения через гибкий кабель 11 передается на электронный блок.

При перемещении приемника кабель фиксируется в определенном положении при помощи ролика 14 с грузом. Лента 3 проходит через зубчатый ролик 9, на оси которого расположен первичный сельсин 10.

Вторичный сельсин находится в показывающем приборе. Ось вторичного сельсина через редуктор связана со стрелками показывающего прибора 12, который имеет две шкалы, градуированные в метрах и сантиметрах. В показывающем приборе имеется преобразователь, преобразующий угловое перемещение оси вторичного сельсина, пропорциональное положению уровня, в стандартный пневматический сигнал. Стандартная индукционная катушка служит для связи с вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы.



Для обеспечения радиационной защиты персонала при транспортировке, монтаже и ремонтных работах внутри объекта измерения источник излучения перемещается автоматически в свинцовый контейнер 5. Отверстие в контейнере при этом закрывается свинцовой пробкой 15, жестко связанной с источником. Диапазон измерения уровня прибором составляет до 10 м, основная погрешность измерения не превышает 1 см.

Использование приборов с радиоизотопными излучателями целесообразно там, где другие методы измерения непригодны.

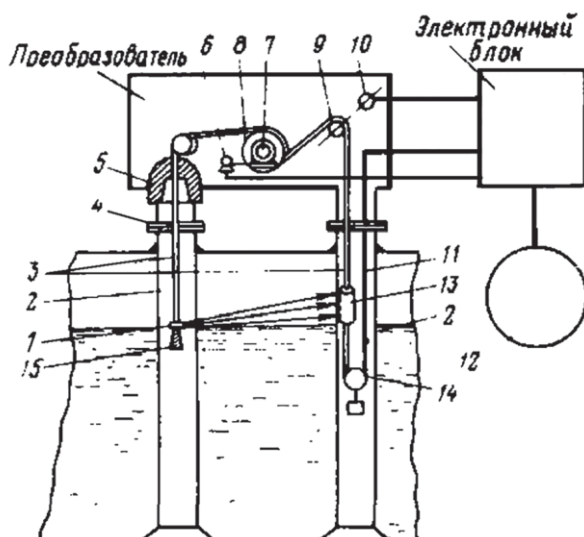


Рис. 5.13. Схема радиоизотопного уровнемера со следящей системой

**Ультразвуковые уровнемеры.** Ультразвуковые уровнемеры позволяют измерять уровень при отсутствии контакта с измеряемой средой и в труднодоступных местах. В ультразвуковых уровнемерах обычно используется принцип отражения звуковых волн от границы раздела жидкость — газ (воздух).

На рис. 5.14 показана блок-схема ультразвукового уровнемера, работающего на отражении звука от границы сред. Прибор состоит из электронного блока, пьезоэлектрического излучателя (преобразователя) и вторичного прибора (автоматического потенциометра).

Электронный блок ЭБ состоит из генератора 1, задающего частоту повторения импульсов, генератора импульсов 2, посылаемых в измеряемую среду, приемного усилителя 4 и измерителя времени 5. Генератор 1 управляет работой генератора 2 и схемой измерения времени. Частота импульсов 300 Гц. Генератор 2 формирует короткие импульсы для возбуждения пьезоэлектрического излучателя 5. Электрический импульс, преобразованный в ультразвуковой в пьезоэлектрическом излучателе, распространяется в жидкой среде, отражается от границы раздела жидкость — воздух, возвращается обратно, воздействуя спустя некоторое время на тот же излучатель, и преобразуется в электрический. Оба импульса, посланный и отраженный, разделенные во времени, поступают на усилитель.

Время  $x$  между моментом посылки импульса и моментом поступления отраженного импульса является функцией высоты измеряемого уровня, т. е.

$$m = 2H / c, \quad (5.2)$$

где  $H$  — высота измеряемого уровня;

$c$  — скорость распространения ультразвука в измеряемой среде; при любой температуре воды скорость распространения ультразвука  $c = 1557 - 0,0245(74 - t^\circ)^2$ .

Постоянное напряжение, пропорциональное времени запаздывания отраженного сигнала (уровню) и получаемое в измерителе времени, подается на вторичный прибор б.

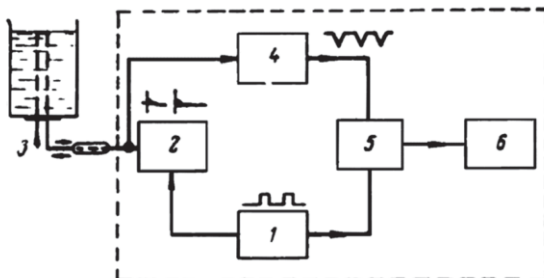


Рис. 5.14. Блок-схема ультразвукового уровнемера



Рис. 5.15. Прибор для ультразвукового измерения уровня Prosonic FMU44

*Prosonic FMU44* — недорогое устройство для измерения уровня в жидкостях и сыпучих продуктах с диапазоном измерения до 20 м.

Прибор подходит для бесконтактного измерения уровня в жидкостях, пастах, сыпучих материалах или измерения расхода в открытых каналах или измерительных водосливах. Двухпроводный или четырехпроводный компактный прибор может использоваться в складских резервуарах, резервуарах с мешалками и на конвейерах. Огибающая кривая может отображаться на дисплее, упрощая диагностику. Также может быть использована функция линеаризации (до 32 точек) для конвертирования измеренного значения в любую единицу длины, объема или расхода.

*Преимущества прибора Prosonic FMU44:*

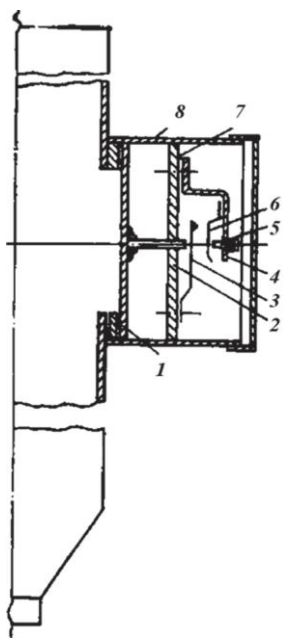
- достоверное бесконтактное измерение;
- быстрое и простое введение в эксплуатацию с помощью четырехстрочного текстового дисплея на основе меню, доступного на 7 языках;
- огибающие кривые на дисплее для упрощенной диагностики;
- герметичное уплотнение и заливка датчика;
- химически устойчивое тефлоновое покрытие;
- калибровка без заполнения или опорожнения;
- встроенный датчик температуры для автоматической коррекции скорости распространения сигнала в зависимости от температуры.

#### *Технические характеристики прибора Prosonic FMU44*

- двух- или четырехпроводный прибор, предназначенный для непрерывного бесконтактного измерения уровня и расхода;
- присоединение к процессу осуществляется с помощью фланца;
- рабочая температура от  $-40$  до  $+80$  °С;
- рабочее давление от  $+0,7$  до  $+2,5$  бар;
- максимальная дистанция измерения: для жидкости 20 м, для сыпучих материалов 10 м;
- дистанция блокировки для жидкостей и сыпучих материалов 0,5 м;
- имеет международные сертификаты взрывозащиты.

### **§ 5.2. Измерение уровня сыпучих тел**

Измерение уровня сыпучих тел имеет свои особенности. Характерным отличием сыпучих тел от жидких является непропорциональность передачи давления на дно и стенки в зависимости от уровня.



На рис. 5.16 показан *указатель уровня с металлической мембраной*. Он состоит из металлической мембраны 1 с закрепленным по центру штоком 2. При прогибе мембраны шток воздействует на контактное устройство 3. На кронштейне 4 закреплена возвратная пружина 5. Для регулирования натяжения возвратной пружины служит винт 6. Изолятор 7 крепится в корпусе сигнализатора 8. При понижении уровня возвратная пружина 5 возвращает мембрану и контактное устройство в исходное положение.

*Рис. 5.16. Указатель уровня с металлической мембраной*

Свойство сыпучих материалов образовывать при насыпании угол естественного откоса позволило создать серию маятниковых приборов, работающих на принципе отклонения материалом чувствительного элемента, выполняемого в виде маятника с жесткой или гибкой подвеской. На рис. 5.17 показан указатель предельного уровня сыпучего материала. При повышении в бункере 1 уровня сыпучего материала 2 с углом естественного откоса чувствительный элемент 3 отклоняется от вертикального положения и замыкает контактную систему 4 включения световой сигнализации 5. Общим недостатком всех указателей уровня маятникового типа является их зависимость от способа загрузки сосуда (бункера) материалом. Например, при беспорядочной загрузке, когда материал может обтекать маятник со всех сторон, может не произойти ожидаемого отклонения маятника 3.

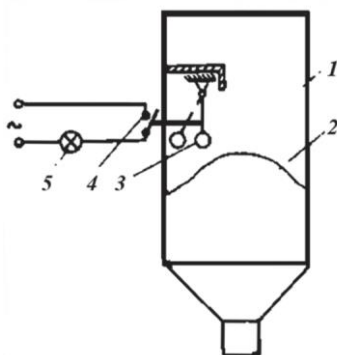


Рис. 5.17. Указатель уровня маятникового типа

Принципиальная схема лотового уровнемера показана на рис. 5.18. В этих уровнемерах зонд 6 и груз 8 подвешены на блоке храпового колеса 4.

Периодически зонд приподнимается при помощи пневматического мембранного привода 2. Привод воздействует на храповое колесо через собачку 3. Зонд опускается на поверхность сыпучего материала 7 под действием силы тяжести.

Если уровень не изменяется, то зонд поднимается и опускается на одно и то же расстояние.

При понижении уровня материала зонд опускается на большее расстояние, чем поднимается, и наоборот. При этом храповое колесо с осью 5 в одном направлении поворачивается на больший угол, чем при повороте в обратном направлении. Ось 5 через муфту 10 и поводок 11 соединена с пневмопреобразователем 12. Устройство прибора рассчитано так, что при изменении уровня в заданных пределах давление сжатого воздуха на выходе прибора изменяется от 20 до 100 кПа.

Сжатый воздух с выхода пневмопреобразователя 12 подается на вторичный прибор (манометр) 9, шкала которого отградуирована в единицах высоты уровня. Рассмотренный уровнемер позволяет измерять уровень до 20 м с погрешностью  $\pm 10$  см.

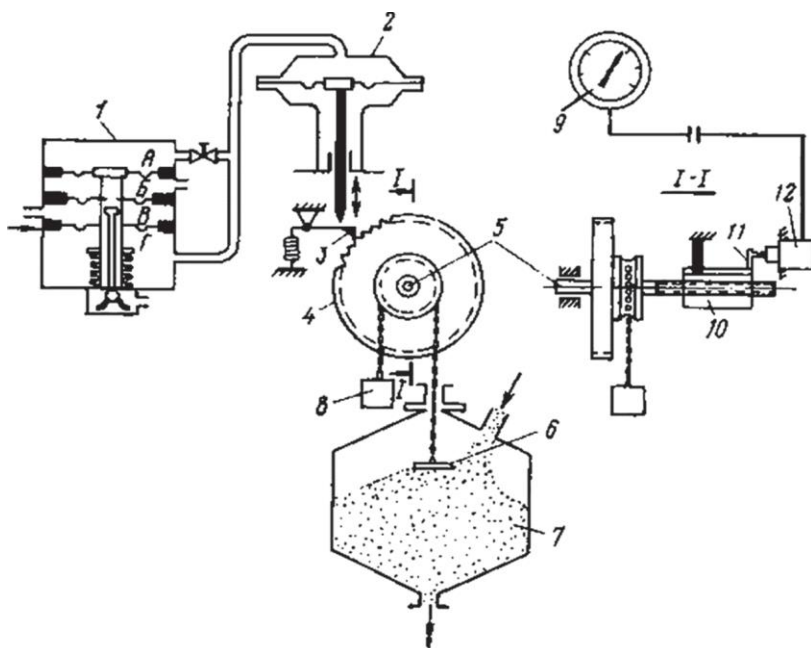


Рис. 5.18. Принципиальная схема лотового уровнемера

В качестве первичного преобразователя уровнемера, работающего на весовом принципе (рис. 5.19), можно использовать месдозу.

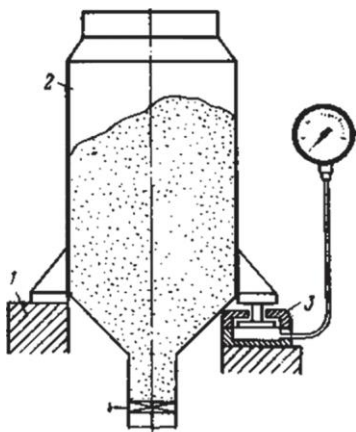


Рис. 5.19. Весовой  
измеритель уровня:  
1 — опора; 2 — бункер;  
3 — поршень

Месдоза представляет собой металлический кожух с закрепленной в нем мембраной. Нижняя часть месдозы заполнена жидкостью, сообщаемой с манометром через импульсную трубку. При изменении веса материала в бункере изменяется давление в системе «месдоза — манометр». Недостатком данного принципа измерения является необходимость в некотором перемещении опоры бункера (от 1 до 3 мм). Погрешность измерения достигает  $\pm 10\%$ .

## ТЕМА № 6

### Контроль температуры

#### § 6.1. Классификация приборов для контроля температуры

Температура является одним из важнейших параметров химико-технологических процессов.

По современным представлениям *температура* — это условная статистическая величина, прямо пропорциональная средней кинетической энергии частиц вещества (молекул или атомов). Практически температуру можно измерять лишь методом сравнения нагретости двух тел, причем степень нагретости одного из тел предполагается известной. Для сравнения степени нагретости тел используют изменение какого-либо физического их свойства, зависящего от температуры и легко поддающегося измерению. Установление единицы измерения температуры связано с установлением температурной шкалы. Допускается применение двух температурных шкал: абсолютной термодинамической в градусах Кельвина (К) и международной практической в градусах Цельсия (°С) в зависимости от начала отсчета (положение нуля) по шкале. Абсолютную температуру обозначают буквой  $T$ , а температуру по шкале Цельсия  $t$ :

$$T = (t + T_0); t = T - T_0,$$

где  $T_0 = 273,15$  К. Например, если температура, измеряемая в градусах Цельсия, равна  $70^\circ\text{C}$ , то по абсолютной термодинамической температурной шкале она равна  $343,15$  К.

Международная практическая температурная шкала, принятая в 1968 г. и введенная как обязательная с 1 января 1971 г., является практическим осуществлением абсолютной термодинамической температурной шкалы. Она выбрана так,



чтобы температура, измеренная по этой шкале, была близка к термодинамической температуре и разность между ними оставалась в пределах современной точности измерений.

**Классификация приборов для измерения температуры.** В зависимости от принципа действия приборы для измерения температуры по ГОСТ подразделяются на следующие группы.

*Манометрические термометры* основаны на изменении давления рабочего вещества при постоянном объеме с изменением температуры.

*Термоэлектрические термометры* включают термоэлектрический преобразователь (ТЭП), действие которого основано на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы от температуры.

*Термометры сопротивления* содержат термопреобразователь сопротивления, действие которого основано на использовании зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента (проводника или полупроводника) от температуры.

Из *пирометров излучения* наиболее распространены:

- квазимонохроматический пирометр, действие которого основано на использовании зависимости температуры от спектральной энергетической яркости, описываемой для абсолютно черного тела с достаточным приближением уравнения Планка и Вина;
- пирометры спектрального отношения, действие которых основано на зависимости от температуры тела отношений энергетических яркостей в двух или нескольких спектральных интервалах;
- пирометры полного излучения, действие которых основано на использовании зависимости температуры от интегральной энергетической яркости излучения.

## § 6.2. Термометры расширения и манометрические термометры

**Термометры расширения.** Это такие приборы, в которых используется наблюдаемое при изменении температуры изменение объема или линейных размеров тел. В зависимости от вида термометрических веществ термометры расширения подразделяются на *жидкостные* и термометры, *основанные на расширении твердых тел*.

Измерение температуры жидкостными стеклянными термометрами основано на различии коэффициентов объемного расширения жидкостями материала оболочки термометра. Показания жидкостного термометра принято характеризовать коэффициентом расширения жидкости в стекле, определяемым уравнением.

Для изготовления термометров применяют стекла специальных сортов (термометрические), обладающие малым значением коэффициента.

В зависимости от интервала измеряемых температур в качестве рабочей жидкости в жидкостных термометрах применяют пентан (от  $-190$  до  $+20$  °C), петролейный эфир (от  $-130$  до  $+25$  °C), этиловый спирт (от  $-100$  до  $+75$  °C), толуол (от  $-90$  до  $+100$  °C) и ртуть (от  $-30$  до  $+700$  °C).

Наибольшее распространение получили ртутные стеклянные термометры. Коэффициент расширения ртути мало изменяется при изменении температуры, поэтому шкала ртутного термометра до  $200$  °C практически линейна. Термометры с органическими жидкостями из-за ряда недостатков применяют только для измерения низких температур. Из всех таких термометров наибольшее распространение получили спиртовые.

Несмотря на большое разнообразие конструкций, все жидкостные стеклянные термометры относятся к одному из двух основных типов: *палочные* (рис. 6.1) и *со вложенной шкалой* (рис. 6.2).



*Рис. 6.1. Палочный термометр  
расширения*



*Рис. 6.2. Термометр расширения  
с вложенной шкалой*

Палочные термометры имеют толстостенный капилляр наружным диаметром 6–8 мм, нижний конец которого образует резервуар для жидкости. Шкалу наносят на внешнюю поверхность капилляра. Термометры со вложенной шкалой имеют тонкостенный капилляр с расширенным резервуаром для ртути. Шкалу наносят на пластинку из молочного стекла, которая вместе с капилляром заключена в стеклянную оболочку, прикрепленную к резервуару термометра. В зависимости от назначения ртутные стеклянные термометры подразделяются на образцовые (1-го и 2-го разрядов), лабораторные и технические. Образцовые термометры 1-го разряда изготавливают только палочного типа, а образцовые 2-го разряда и лабораторные — палочного типа или со вложенной шкалой. Технические термометры изготавливают только со вложенной шкалой. Технические и лабораторные термометры могут иметь шкалы с различными пределами. Разновидностью ртутных являются контактные термометры (рис. 6.3), используемые в основном для сигнализации о нарушении заданного температурного режима. На рисунке 6.3 показан одноконтактный термометр с контактами из платиновой

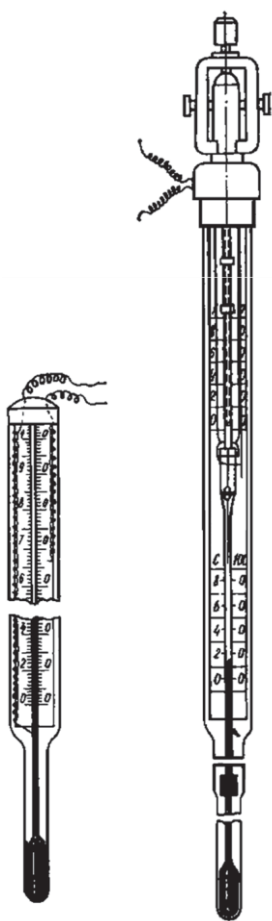


Рис. 6.3. Контактные термометры

проволоки, впаянными в нижнюю часть капилляра на уровне отметки, соответствующей той температуре, о которой нужно сигнализировать или которую необходимо поддерживать постоянной. К контактам припаяны проводники из медной проволоки, которые через соответствующие реле включены в цепь электрического нагревателя или сигнализации. В тот момент, когда оба контакта соединяются столбиком ртути, происходит замыкание электрической цепи реле, которое выключает электрический нагреватель или включают сигнализацию.

Контактные термометры бывают с двумя и тремя контактами, с переменным положением верхнего контакта и т. д.

Если термометр, градуированный при полном погружении в среду, по условиям эксплуатации не может быть полностью погружен в измеряемую среду, то резервуар его и жидкостный столбик будут находиться при разных температурах. Поправку на выступающий столбик вычисляют по формуле

$$\Delta t = n \beta_{t1,t2} (t_2 - t_1), \quad (6.2)$$

где  $n$  — число градусов на выступающем столбике;

$\beta_{t1,t2}$  — коэффициент расширения жидкости в стекле (для ртути 0,00016, для спирта 0,001);

$t_2$  — температура, показываемая термометром;

$t_1$  — средняя температура выступающего столбика, измеряемая вспомогательным термометром, резервуар которого прикреплен к середине выступающего столбика основного термометра.

Если температура выступающего столбика ниже измеряемой, то поправка  $\Delta t$  имеет положительный знак, а если выше — отрицательный. Ошибки, вызванные выступающим столбиком, могут достигать значительной величины, и пренебрегать ими не следует.

Ртутные стеклянные термометры широко применяют в лабораторной и производственной практике.

**Биметаллические термометры.** Чувствительным элементом таких термометров является биметаллическая пластинка. Обычно внутренний слой этой пластинки изготовляют из металла, имеющего большой коэффициент линейного расширения, а наружный — из металла с малым коэффициентом (из инвара). При повышении температуры пластинка разгибается. Деформация пластинки через тягу, зубчатый механизм и шестеренку передается стрелке. Верхний предел измерения этих термометров ограничивается пределом упругости материалов. Основная область их применения — автоматическое регулирование температуры и сигнализация предельных значений температур.

Биметаллические элементы применяют также для защиты электрических цепей от перегрузок. В этом случае биметаллическая пластинка при повышении тока нагрузки сверх допустимого значения деформируется и разрывает электрическую цепь пускателя, отключающего нагрузку.



*Рис. 6.4. Термометр  
биметаллический  
РОСМА*

Строение биметаллических термометров основано на различии теплового расширения веществ, из которых изготовлены пластины применяемых чувствительных элементов. Биметаллические термометры используются для измерения температуры в жидких и газообразных средах, в том числе на морских и речных судах, атомных электростанциях.

Биметаллические термометры БТ (стандартное исполнение, тыльное присоединение) применяются для многостороннего использования в промышленности, отопительных и санитарных установках, системах кондиционирования и вентиляции.

В общем случае биметаллические термометры состоят из двух тонких лент металла, например медной и железной, которые при нагревании расширяются неодинаково. Плоские поверхности лент плотно прилегают одна к другой. Такая биметаллическая система скручена в спираль, один из концов этой спирали жестко закрепляется. При нагревании или охлаждении спирали ленты, изготовленные из разных металлов, расширяются или сжимаются по-разному. Следовательно, спираль термометра или раскручивается, или туже скручивается. По указателю, который прикреплен к свободному концу спирали, можно судить о величине изменений. Примером биметаллического термометра может служить комнатный термометр с круглым циферблатом.

*Технические характеристики термометра биметаллического РОСМА:*

- диаметр 40; 50; 63; 80; 100 мм;
- классы точности 1,5; 2,5;
- рабочий диапазон от  $-50$  до  $+500$  °C;
- длина погружной части 30–250 мм;
- рабочее давление на гильзе 25 бар;
- медный сплав Ø 8 мм;
- циферблат из алюминия, белого цвета, шкала черного цвета; стрелка из алюминия, черного цвета;
- инструментальное стекло;
- защита IP 50;
- присоединение с помощью латунной гильзы с резьбой G1/2" или гильзы из нержавеющей стали с резьбой G1/2" (опция).

**Манометрические термометры.** Действие манометрических термометров основано на изменении давления рабочего вещества, заключенного в емкость постоянного объема, при изменении его температуры (рис. 6.5).

Прибор состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 2 и манометрической части 3–6.

Всю систему прибора (термобаллон, капилляр, манометрическая пружина) заполняют рабочим веществом. Термобаллон помещают в зону измерения температуры. При нагревании термобаллона давление рабочего вещества внутри замкнутой системы увеличивается.

Увеличение давления воспринимается манометрической пружиной, которая воздействует через передаточный механизм на стрелку или перо прибора.

Манометрическая пружина выполняется как в виде одно- или многовитковой пружины, так и в виде сильфона (как у рассмотренных выше манометров). Длина и диаметр термобаллона могут быть различными. Термобаллоны обычно изготавливают из стали или латуни, обладающей высокой теплопроводностью, а капилляр — из медной или стальной трубки с внутренним диаметром от 0,15 до 0,5 мм. Длина капилляра может быть различной (от 0,25 см до 60 м). Для защиты от механических повреждений капилляр часто помещают в защитную оболочку из оцинкованного стального провода.

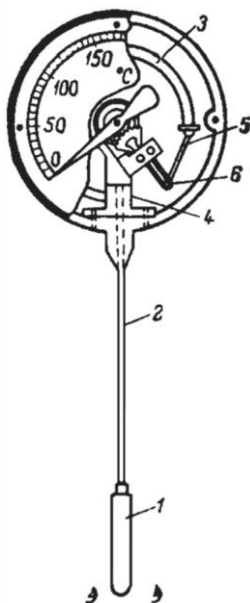


Рис. 6.5. Манометрический термометр с трубчатой пружиной:

- 1 — термобаллон;
- 2 — капиллярная трубка;
- 3 — трубчатая пружина;
- 4 — держатель;
- 5 — поводок;
- 6 — сектор

Манометрические термометры широко применяют в химических производствах. Этими приборами можно измерять температуру в интервале от  $-120$  до  $+600$  °С.

Различают манометрические термометры следующих типов:

- 1) *газовые*, вся система которых заполнена газом под некоторым начальным давлением; в качестве заполнителя применяют азот, аргон, гелий;
- 2) *жидкостные*, система которых заполнена жидкостью; в качестве заполнителя используют полиметилсилоксановые жидкости;
- 3) *конденсационные*, в которых термобаллон частично заполнен низкокипящей жидкостью, а остальное его пространство заполнено парами этой жидкости; термосистемы заполняют ацетоном, метилом хлористым, фреоном.

Устройство манометрических термометров всех типов аналогично. Они бывают *показывающими*, *самопишущими* и *контактными*. Основная погрешность манометрических термометров всех видов равна  $\pm 1,5$  % от максимального значения шкалы при нормальных условиях. При отклонении условий от нормальных возникают дополнительные погрешности, которые рассчитывают или компенсируют.

Работа газового манометрического термометра основана на законе Шарля, устанавливающего прямую зависимость между давлением и температурой идеального газа

$$P_t = P_0 [1 + \beta (t - t_0)], \quad (6.3)$$

где  $\beta = 1/273,15$  — термический коэффициент расширения газа,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$t$  — конечная температура,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_0$  — начальная температура,  $^\circ\text{C}$ .



Шкала термометра получается равномерной, что является его преимуществом. Отклонение температуры окружающей среды от +20 °С вызывает погрешность измерения, которую можно рассчитать по приближенной формуле:

$$\Delta t_m = (V_m / V_\sigma) (t_m - t_0), \quad (6.4)$$

где  $V_m$  — объем манометрической пружины;

$V_\sigma$  — объем термобаллона;

$V_m$  — температура среды, окружающей манометр, °С;

$t_0$  — температура градуировки прибора (20 °С).

Погрешность от нагревания капиллярной трубки

$$\Delta t_k = (V_k / V_\sigma) (t_k - t_0) \quad (6.5)$$

где  $V_k$  — объем капиллярной трубки;

$t_k$  — температура среды, окружающей капилляр, °С.

Из формулы (6.5) видно, что погрешность возрастает пропорционально объему, а следовательно, и длине капилляра. Ее можно уменьшить, увеличив объем термобаллона при той же длине капилляра. Обычно объем термобаллона составляет 90 % общего объема термометра. При правильно выбранном соотношении объема термобаллона, капилляра и трубчатой пружины термометры с достаточной точностью могут работать без температурной компенсации при длине капилляра до 40 м.

Во всех случаях при эксплуатации необходимо предохранять манометр и капилляр от действия теплового излучения окружающих нагретых предметов.

Иногда для компенсации погрешностей от колебания температуры манометра применяют компенсационное устройство в виде биметаллической спирали, встроенной в передаточный механизм манометра. Биметаллическая спираль при изменении температуры манометра действует в обратном направлении относительно основной пружины.

К специфическим недостаткам газовых манометрических термометров относится их значительная тепловая инерция, обусловленная низким коэффициентом теплоотдачи от стенки термобаллона к наполняющему его газу и малой теплопроводностью последнего.

Действие жидкостных манометрических термометров основано на зависимости изменения давления от температуры

$$\Delta P = (\beta / \mu) \Delta t, \quad (6.6)$$

где  $\Delta P$  — изменение давления, МПа;

$\beta$  — коэффициент объемного расширения жидкости,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$\mu$  — коэффициент сжимаемости жидкости,  $\text{см}^2/\text{кг}$ ;

$\Delta t$  — изменение температуры,  $^\circ\text{C}$ .

Из уравнения 6.5 видно, что изменение объема жидкости является линейной функцией температуры. Это определяет равномерность шкалы жидкостных термометров. Следует отметить, что погрешности от колебания температуры окружающей среды для жидкостных термометров больше, чем для газовых. Эти погрешности вычисляют по тем же формулам, что и для газовых термометров. Особенно значительные погрешности получаются при колебании температуры капилляра, поэтому при значительной его длине необходимо применять компенсационное устройство.



Рис. 6.6. Термометр манометрический SW15

Защитный ограничитель температуры SW15 применяется для мониторинга неполадок оборудования.

При достижении неподвижной точки переключения срабатывает микропереключатель. Он приводится в действие контактным диском, установленным на передающей тяге стрелки.

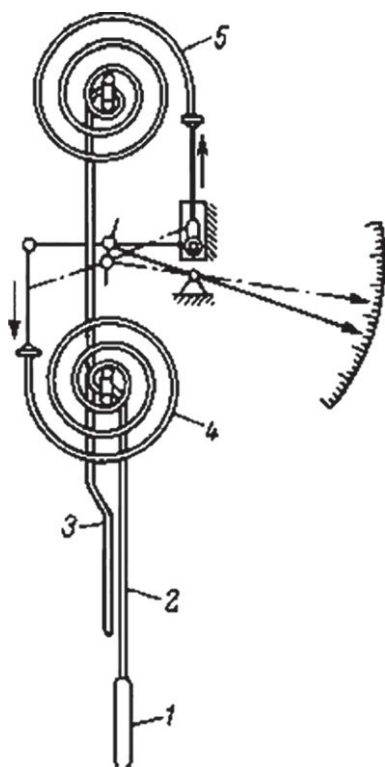
Другой случай срабатывания переключателя — разрыв капилляра. Когда оборудование попадает в рабочий диапазон, прибор возвращается в исходное положение.

*Технические характеристики прибора SW15:*

- вид защиты: корпус IP53, зажимы IP00;
- номинальный размер, мм: 60, 72 × 72;
- класс точности: 2 по EN 13190;
- диапазон измерений: 0–400 °C;
- диапазон температуры: от –40 до +60 °C;
- циферблат: белый алюминий, черный шрифт;
- принцип измерения: трубка Бурдона;
- исполнение контактов: 1 фиксированный перекидной контакт;
- контакты: микропереключатели;
- контактный ток: 5А неиндуктивный, 250 В, 40–60 Гц;
- электрическое присоединение: 0,8 × 6,3 мм плоский разъем или разъем AMP
- капилляр:
  - с пластиковым покрытием (от –40 до +120 °C);
  - с медной оплеткой (от –40 до +350 °C);
  - нержавеющая сталь (от –100 до +400 °C);
- длина капилляра: максимум 5 м;
- вывод капилляра: присоединение снизу сзади;
- тип монтажа: монтаж в панель с помощью монтажной скобы.

На рис. 6.7 показана схема компенсационного устройства, имеющего рядом с основным капилляром дополнительный (компенсационный) капилляр. Один конец у термобаллона запаян, а другой соединен со вспомогательной (компенсационной) пружиной. Оба капилляра и обе пружины

заполнены одной и той же рабочей жидкостью и имеют одинаковые характеристики. С изменением температуры окружающей среды давление жидкости в обоих капиллярах и в обеих пружинах изменяется, поэтому вспомогательная пружина действует в направлении, противоположном действию основной пружины и тем самым исключается влияние температуры окружающей среды на показания прибора.



*Рис. 6.7. Схема температурной компенсации ртутного манометрического термометра:*

*1 — термобаллон; 2 — основной капилляр;*

*3 — дополнительный капилляр;*

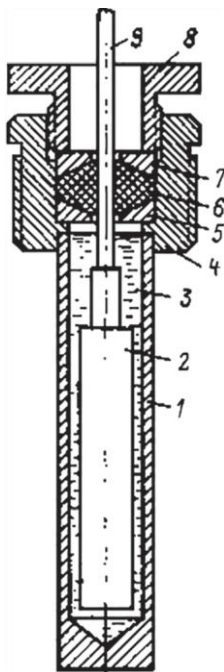
*4 — основная спиральная трубчатая пружина;*

*5 — вспомогательная спиральная трубчатая пружина*

Для жидкостных термометров следует также учитывать погрешность, вызванную различным положением термобаллона относительно манометра по высоте; эту погрешность можно скомпенсировать, корректируя нуль после установки прибора.

В конденсационных манометрических термометрах термобаллон обычно заполнен на  $\frac{2}{3}$  объема низкокипящей жидкостью. В замкнутой системе термометра всегда существует динамическое равновесие одновременно протекающих процессов испарения и конденсации. При повышении температуры усиливается испарение жидкости и увеличивается упругость пара, а следовательно, усиливается также и процесс конденсации. В результате этого насыщенный пар достигает некоторого определенного давления, строго отвечающего температуре. Изменение давления насыщенного пара непропорционально изменению температуры, поэтому шкала конденсационного термометра получается неравномерной. Это один из его недостатков.

Манометрические термометры всех видов характеризуются значительным запаздыванием показаний, зависящим от физического состояния наполнителей и их теплофизических характеристик. Газовые термометры имеют наибольшее запаздывание, а парожидкостные — наименьшее (примерно в 2,5 раза меньше, чем газонаполненные); жидкостные термометры занимают промежуточное положение. При измерении температуры агрессивных сред или продуктов в аппаратах, работающих при высоких давлениях, термобаллон манометрического термометра устанавливают в защитную гильзу (рис. 6.8).



*Рис. 6.8. Термобаллон манометрического термометра  
в защитной гильзе:*

*1 — защитная гильза; 2 — термобаллон, 3 — наполнитель гильзы;  
4 — футеровка; 5 — нижняя разъемная шайба; 6 — уплотнительная  
набивка; 7 — верхняя разъемная шайба; 8 — втулка; 9 — капилляр*

Для работы со вторичными приборами изготавливают манометрические термометры с электрической и пневматической дистанционной передачей показаний.

Приборостроительная промышленность выпускает термометры манометрические различных видов.

### **§ 6.3. Электрические термометры сопротивления**

Измерение температуры по электрическому сопротивлению тел основано на зависимости его от температуры.

Электрические термометры сопротивления позволяют измерять температуру с высокой степенью точности — до  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при измерениях небольшой разности температур — до  $0,0005\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Термометры сопротивления по сравнению с манометрическими термометрами обладают следующими преимуществами: более высокой точностью измерения; возможностью передачи показаний на большие расстояния; возможностью централизации контроля температуры, достигаемой присоединением (через переключатель) нескольких термометров к одному измерительному прибору, и меньшим запаздыванием показаний.

Промышленные термометры сопротивления ГСП конструктивно состоят из термоэлемента (чувствительного элемента) и наружной (защитной) арматуры. В качестве материала для чувствительных элементов промышленных термопреобразователей сопротивления используют металлы с хорошей электропроводностью, такие как платина, медь. Чувствительный элемент металлического термопреобразователя сопротивления представляет собой тонкую платиновую или медную проволоку, помещенную в каналы защитного каркаса и намотанную на каркас или свернутую в спираль и (рис. 6.9).

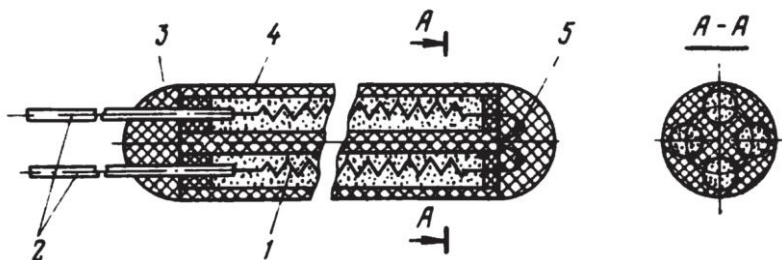


Рис. 6.9. Конструкция платинового чувствительного элемента:

1 — платиновая спираль; 2 — выводы; 3 — термоэлемент;

4 — керамический каркас; 5 — пайка спиралей

Платиновые термометры сопротивления (ТСП) предназначены для измерения температур от  $-260$  до  $+750$  °С. Для измерения низких температур (до  $-260$  °С) применяют ТСП, защитная гильза которых заполнена гелием.

Медные термометры изготавливают только техническими (тип ТСМ) по ГОСТ 6651–94. Конструктивная форма их показана на рис. 6.10.

Медную изолированную проволоку 1 диаметром 0,08 мм наматывают обычно без каркаса бифилярно и покрывают фторопластовой пленкой 2. Концы проволоки припаивают к выводам 3, которые присоединяют к зажимам головки термометра. Медные термометры выпускают для измерения температуры от  $-50$  до  $+180$  °С.

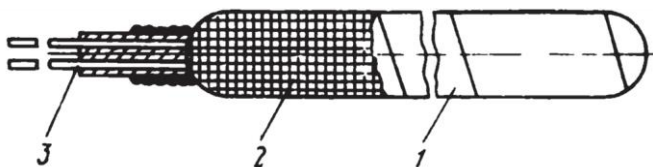


Рис. 6.10. Конструкция медного термометра сопротивления

Типы, основные параметры и размеры термометров сопротивления, выпускаемых промышленностью, регламентированы ГОСТом. Условные обозначения градуировки термометров сопротивления ТСП установлены следующие: гр. 20; 21; 22; 23 и 24.

Для термометров с градуировкой 20, 21 и 22 начальное сопротивление ( $R_0$ ) составляет соответственно 10; 46 и 100 Ом. Термометры сопротивления медные ТСМ выпускаются с сопротивлением  $R_0 = 53$  Ом (гр. 23) и  $R_0 = 100$  Ом (гр. 24).





*Рис. 6.11. Комплект  
термометров  
сопротивления КТПТР-01*

Комплекты термопреобразователей КТПТР-01 предназначены для измерения температуры и разности температур в составе теплосчетчиков и других приборов учета и контроля тепловой энергии в тепловых сетях промышленных предприятий и теплоснабжающих организаций.

Комплект термометров представляет собой два платиновых термометра, подобранных по заданным параметрам таким образом, что разница между ними в показаниях тем-

пературы минимальна, что позволяет снизить до минимума погрешность в показаниях потребляемой тепловой энергии.

Характеристики комплекта в части конструктивных особенностей, устойчивости к воздействию факторов окружающей среды, механическим воздействиям, давлению, а также климатическое исполнение соответствуют аналогичным параметрам входящих в комплект термометров. Электрическая схема соединений — четырехпроводная.

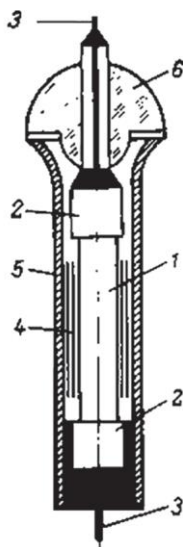
**Терморезисторы.** Для изготовления термопреобразователей сопротивления применяют также полупроводники, оксиды титана, магния, железа, никеля, меди или кристаллы некоторых металлов (например, германия). Существенным преимуществом полупроводниковых термометров (терморезисторов) является их большой температурный коэффициент электрического сопротивления. Поэтому из полупроводников можно делать термометры с большим начальным сопротивлением, что позволяет снизить до незначительных величин погрешности, вызываемые изменением температуры соединительных проводов.

Для измерения температуры наиболее часто применяют терморезисторы типов ММТ-1, ММТЧ, ММТ-6, КМТ-4, сопротивление которых в рабочих интервалах температур изменяется по экспоненциальному закону.

Основными недостатками, препятствующими широкому внедрению терморезисторов в практику систем автоматического контроля, являются:

- низкая воспроизводимость параметров, что исключает их взаимозаменяемость;
- сравнительно невысокая максимальная рабочая температура (от  $-60$  до  $180$  °С).

На рис. 6.12 показан стержневой терморезистор, представляющий собой цилиндр 1 с контактными колпачками 2, к которым припаяны выводы 3. Цилиндр покрыт эмалевой краской и обмотан металлической фольгой 4. Снаружи терморезистор защищен металлическим чехлом 5, в верхней части которого имеется стеклянный изолятор 6.



*Рис. 6.12. Бусинковое полупроводниковое термосопротивление*

**Измерительные приборы термометров сопротивления.** Сопротивление термометров можно измерить по обычным в электротехнике мостовым схемам: уравновешенным и не-уравновешенным.

Простейшая схема уравновешенного моста показана на рис. 6.13, а. Термометр сопротивления  $R_t$  и расположенные последовательно с ним два сопротивления  $R_n$  соединительных линий включаются в плечо  $CB$  мостовой схемы. В диагональ  $DB$  моста подается напряжение от батареи  $B$ . Изменяя величину сопротивления  $R_3$  добиваются равенства напряжения в точках  $A$  и  $C$ , что подтверждается отсутствием тока в диагонали  $AC$  при измерении его гальванометром  $G$ . Такое положение соответствует равному отношению падения напряжения в плечах обеих ветвей моста.

Сопротивление линии  $R_n$  подгоночной катушкой устанавливается постоянным. Сопротивления  $R_2$  и  $R_1$  постоянны и выполнены (так же, как и сопротивление  $R_3$ ) из манганина. Мостовая схема изображена на рис. 6.13, а; она отличается высокой точностью измерения и практически не зависит от напряжения батареи  $B$ .

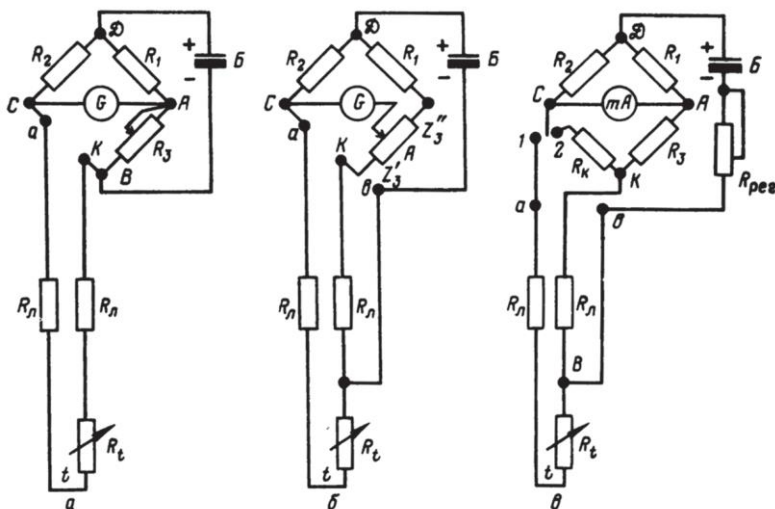


Рис. 6.13. Схемы измерительных мостов для измерения сопротивления термометров: а — простейший уравновешенный мост; б — уравновешенный мост с трехпроводным включением термометра; в — неуравновешенный мост

При нулевом отсчете по гальванометру отпадают погрешности, обусловленные температурой окружающей среды и посторонними магнитными воздействиями. Некоторую неопределенность в эту схему может внести переходное сопротивление передвижного контакта  $R_3$ , а также возможное изменение сопротивления соединительных проводов  $R_l$ , поскольку изменяется их температура. Эти неопределенности практически можно исключить, если собрать мостовую схему, показанную на рис. 6.13, б. В этом случае передвижной контакт не относится к сопротивлению плеча АВ, а включен в диагональ СА, сопротивление которой в момент отсчета (при нулевом токе) практически не имеет значения. Для устранения влияния возможного изменения сопротивления  $R_l$  соединительных линий на показания моста точка В перенесена к термометру.

В трехпроводной схеме влияние величины  $\Delta R_l$  на показания будет существенно меньше (на порядок и больше), чем в двухпроводной схеме, даже для самой неблагоприятной точки шкалы. В трехпроводных схемах сопротивление каждой линии доводится до установленного значения  $R_l$  при помощи отдельных подгоночных сопротивлений в каждой линии.

На рис. 6.13, в показана схема неуравновешенного моста для измерения сопротивления  $R_t$ , включенного по трехпроводной схеме. В диагональ моста СА включается вместо гальванометра миллиамперметр  $mA$ . Напряжение питания моста в диагонали BD должно поддерживаться постоянным. Контроль напряжения в диагонали BD осуществляется включением контрольного сопротивления  $R_k$  при переключателе в положении 2.

Для установленного значения напряжения при постоянных сопротивлениях плеч  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_k$  сила тока в диагонали СА будет иметь определенное значение, что контролируется миллиамперметром. Отклонение от установленной величины тока корректируется сопротивлением  $R_{рег}$ . После

того, как установится напряжение  $E_{BD}$  в точках  $B$  и  $D$  переключатель ставят в положение  $I$  и измеряют сопротивление  $R_i$  по силе тока  $I_{CA}$  в диагонали  $CA$ .

Недостаток схемы — необходимость поддержания постоянного напряжения в вершинах  $CA$  — можно легко устранить, применив источники стабилизированного питания типа ИПС по ГОСТ.

В последние годы неуравновешенные мосты для измерения температур применяют редко, лишь в приборах для измерения величин, преобразуемых в активное сопротивление.

**Логометры.** Эти приборы предназначены в основном для измерения температуры при помощи термометров сопротивления. Логометры построены на принципе сравнения сил токов в цепях термометра и постоянного сопротивления.

Логометр представляет собой двухрамочный магнитоэлектрический миллиамперметр. Подвижная часть его (рис. 6.14, *а*) состоит из двух рамок  $R_1$  и  $R_2$ , жестко соединенных одна с другой и со стрелкой, конец которой перемещается вдоль шкалы. Рамки охватывают неподвижный сердечник  $C$  и могут перемещаться в зазоре переменной ширины между полюсами  $S$  и  $N$  постоянного магнита и сердечника. Вся подвижная система укреплена по центру сердечника, обычно на керновых опорах. Для подвода тока к рамкам применяют спиральные пружины либо без моментных вводов, практически не создающие противодействующего момента, либо маломощные, противодействующий момент которых много меньше магнитоэлектрического момента рамок.

Обе рамки питаются от общего источника постоянного тока  $B$  (рис. 6.14, *б*) с напряжением  $E_b$ .

Последовательно с рамкой включено постоянное сопротивление  $R_k$ , а последовательно с рамкой  $R_2$  — термометр  $R_t$ . Магнитные моменты, возникающие в рамках, соответственно равны

$$M_1 = k_1 B_1 i_1 ; \quad (6.7)$$

$$M_2 = k_2 B_2 i_2 , \quad (6.8)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — постоянные коэффициенты, определяемые геометрическими размерами рамок и числом витков проводов в них;

$B_1$  и  $B_2$  — магнитные индукции в местах расположения рамок.

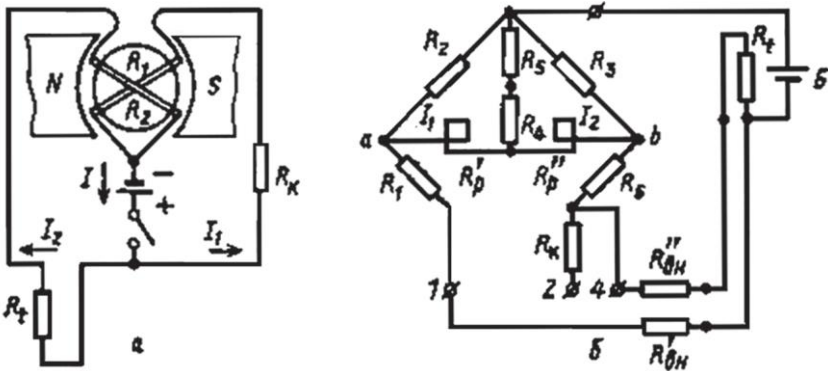


Рис. 6.14. Логометр:

*а* — принципиальная схема; *б* — электрическая схема; 1–4 — зажимы

В различных точках затора переменной ширины магнитная индукция будет различной. Отношение индукций  $B_1$  и  $B_2$  для жестко скрепленных рамок зависит от их угла поворота

$$\varphi = f_1 (B_1 / B_2).$$

В положении равновесия магнитные моменты рамок будут равны

$$k_1 B_1 i_1 = k_2 B_2 i_2$$

или

$$B_1 / B_2 = k_2 i_2 / R_1 i_1 , \quad (6.9)$$

откуда угол поворота рамок

$$\varphi = f_2 (i_2 / i_1) = f_2 [(R_1 + R_K) / (R_2 + R_t)]. \quad (6.10)$$

Учитывая, что  $R_1$  и  $R_2$  и  $R_K$  практически постоянны,

$$\varphi = F(R_t). \quad (6.11)$$

Напряжение батареи  $B$  теоретически совсем не влияет на угол поворота рамок. Практически изменение напряжения становится заметным лишь при отклонениях, отличающихся от номинального (расчетного) значения более чем на 20 %.

Для повышения чувствительности в реальные схемы включают рамки логометра  $R_p'$  и  $R_p''$  в диагональ неуравновешенного моста с постоянными сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  и  $R_3$  (рис. 6.14, б) Манганиновое  $R_4$  и медное  $R_5$  сопротивления служат для уменьшения общего температурного коэффициента логометра (при изменении температуры окружающей среды). Термометр  $R_t$  с сопротивлениями линий  $R_l$  может быть включен в трехпроводной схеме. В цепь термометра сопротивления вводится нормально закороченное сопротивление  $R_K$  (иногда обозначаемое  $R_3$ ). При контроле работы логометра снимают закорачивающий шунт сопротивления  $R_K$  и закорачивает термометр  $R_t$ , соединяя точки 1 и 2 схемы. Стрелка логометра должна при этом устанавливаться на определенном значении шкалы прибора (красной черте).

Классы точности переносных логометров — 0,2; 0,5 и 1,0, а стационарных щитовых — 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5. Логометры могут быть показывающими, самопишущими (до 12 точек измерения), а также иметь дополнительные устройства для регулирования и сигнализации.

**Автоматические мосты.** В автоматических уравновешенных мостах (рис. 6.15) движок реохорда перемещается автоматически. Измерительная схема мостов питается как постоянным, так и переменным током.

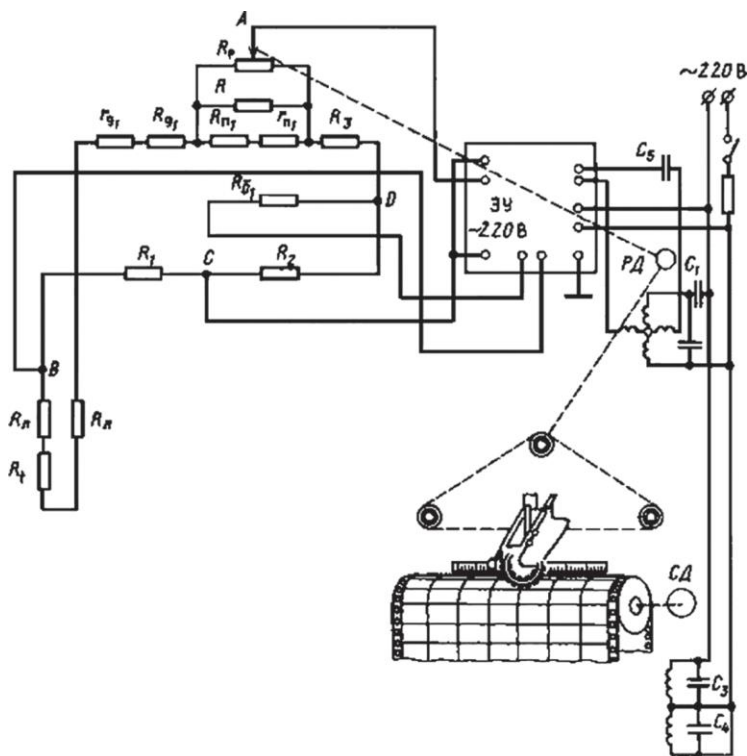


Рис. 6.15. Автоматический уравновешенный электронный мост типа КСМ-4:

СД — синхронный двигатель

В автоматических мостах переменного тока решающее влияние на измерение оказывают активные сопротивления, поэтому приведенные выше соотношения для мостов постоянного тока сохраняются и для автоматических мостов переменного тока. Последние имеют ряд преимуществ перед мостами постоянного тока: измерительная схема питается от одной из обмоток силового трансформатора электронного усилителя, т. е. не требуется дополнительного источника питания и отпадает необходимость в применении вибрационного преобразователя.



Существует много различных модификаций автоматических уравновешенных мостов, однако принцип их работы одинаков. В качестве примера здесь рассматривается принципиальная схема электронного автоматического уравновешенного моста типа КСМ-4. Питание моста подается в диагональ от отдельной обмотки трансформатора в усилителе ЭУ. Для получения расчетного напряжения на вершинах  $B$  и  $O$  в диагональ включается балластное сопротивление. Термометр  $R_t$  включен по трехпроводной схеме в плечо моста  $AB$ . Реохорд  $R_p$  вместе с шунтирующим сопротивлением обычно имеет приведенное сопротивление, равное 90 Ом.

Сопротивления  $(R_{III} + r_{II})$  и  $(R_{OI} + r_{OI})$  определяют пределы измерения по шкале. Значения сопротивлений моста  $R_1$  и  $R_2$  и  $R_3$  определяются соответствующим расчетом. Измерительная схема питается переменным током. Это исключает необходимость применения вибрационного преобразователя. Поскольку мост является уравновешенным, нет необходимости строго выдерживать постоянство напряжения на вершинах  $B$  и  $D$ . Поэтому никаких стабилизаторов напряжения не предусмотрено. Уравновешенные мосты выпускают нескольких модификаций. Они могут быть однотоочечными и многоточечными (количество точек — 6, 12 или 24); класс точности уравновешенных мостов 0,5.

Для дистанционного измерения температуры применяют преобразователи различных типов.

## § 6.4. Термоэлектрические термометры

Измерение температуры термоэлектрическими преобразователями основано на термоэлектрическом эффекте Зеебека: в замкнутой цепи, состоящей из двух или более разнородных проводников, возникает электрический ток, если хотя бы два места соединения (спая) проводников имеют разную температуру.

Цепь, состоящая из двух разнородных проводников (рис. 6.16), называется *термоэлектрическим преобразователем* (ТЭП). Спай, имеющий температуру  $t$ , называется горячим или рабочим, а второй, имеющий постоянную температуру  $t_0$  — холодным, или свободным. Проводники  $A$  и  $B$  называются термоэлектродами. Термоэлектрический эффект объясняется наличием в металле свободных электронов, число которых в единице объема различно для разных металлов. В спае с температурой электроны из металла  $A$  диффундируют в металл  $B$  в большем количестве, чем обратно. Поэтому металл  $A$  заряжается положительно, а металл  $B$  — отрицательно.

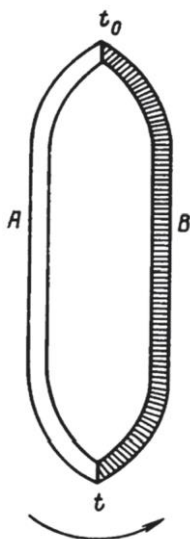


Рис. 6.16. Термоэлектрическая цепь из двух проводников

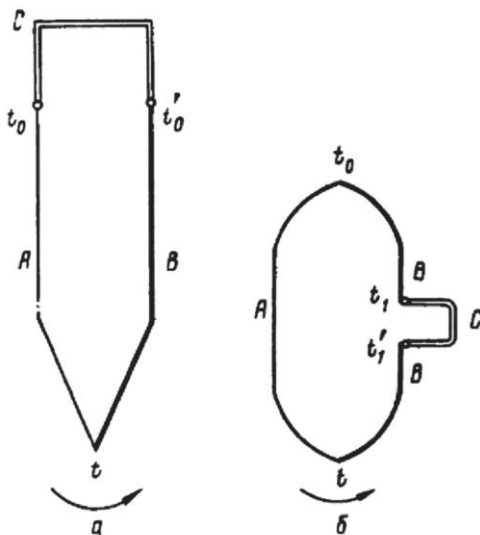


Рис. 6.17. Цепь с третьим проводником  $C$ , включенным:  
а — в спай термопреобразователя;  
б — в термоэлектрод термопары

Если для данной термопары найдена зависимость  $E_{AB} = f(t)$ , определяемая градуировкой, то измерение температуры сводится к определению ТЭДС термопары.

Для включения измерительного прибора в цепь ТЭП необходимо разорвать электрическую цепь. Сделать это можно в спае с температурой (рис. 6.17, *а*) или в одном из термоэлектродов (рис. 6.17, *б*).

Несмотря на внешнее различие схем, показанных на рис. 6.17, ТЭДС, развиваемые термоэлектрическими преобразователями ТЭП, одинаковы, если температуры  $t$ ,  $t_0$  и температуры концов проводника  $C$  также одинаковы. Из этого следует, что ТЭДС ТЭП не изменяется от введения в его цепь третьего проводника, если концы этого проводника имеют одинаковые температуры. На этом основании в цепь ТЭП включают соединительные провода, измерительные приборы и подгоночные сопротивления.

При неравенстве температур концов третьего проводника ТЭДС ТЭП уменьшится на величину ЭДС паразитной пары  $AC$  (рис. 6.17, *а*) при температурах концов проводника  $t_1'$  и  $t_0$  и  $t_0'$ . Из этого следует, что в цепи ТЭП желательно применять проводники, термоэлектрические свойства которых незначительно отличаются от таковых свойств термоэлектродов термоэлектрических преобразователей.

Как уже говорилось, ТЭДС ТЭП является функцией измеряемой температуры лишь при условии постоянства температуры холодного спая ( $t_0 = const$ ).

ТЭП градуируют при определенной постоянной температуре холодного спая (обычно при  $t_0 = 0$  °С, реже при  $t_0 = 20$  °С). При измерениях температура холодного спая может быть иной ( $t_0'$ ), не равной температуре градуировки. Несовпадение температур  $t_0$  и  $t_0'$  вызывает необходимость внесения поправки. Величину поправки можно получить для данного ТЭП из градуировочной таблицы или, при не больших значениях разности  $t_0 - t_0'$ , из характеристической

кривой. При этом можно принять прямолинейную зависимость  $E = f(t)$ .

В дальнейшем величину ТЭДС ТЭП будем обозначать  $E_{т.}$ . По ГОСТ 3044–84 принято шесть видов технических термоэлектрических преобразователей с металлическими термоэлектродами.

*Платинородий-платиновые* (платинородий содержит 90 % платины и 10 % родия) ТЭП. Тип ТПП имеет градуировку ППбв. В зависимости от назначения эти ТЭП разделяют на эталонные, образцовые и рабочие. Платинородий-платиновые преобразователи надежно работают в нейтральной и окислительных средах, но быстро выходят из строя в восстановительной среде. К недостаткам преобразователей этого типа следует отнести малую ТЭДС по сравнению с ТЭДС других ТЭП. Диаметр термоэлектродной проволоки, применяемой для ТЭП типа ТПП, составляет 0,3 или 0,5 мм.

*Платинородий-платинородиевые* (соответственно 30 и 6 % родия) ТЭП (тип ТПР) имеют градуировку ПР 30/668. Особенностью преобразователя данного типа является то, что он развивает очень малую ТЭДС (0,04 мВ при 120 °С и 0,002 мВ при 20 °С), что не требует поправки на температуру холодных спаев.

*Хромель-алюмелевый преобразователь* (94 % Cr + 2 % Al + + 2,5 % Mn + 1 % Si + 0,5 % примеси) ТЭП (тип ТХА) имеет градуировку ХА68. Эти ТЭП применяют для измерения температур до 1 300 °С. Кривая зависимости ТЭДС для данного преобразователя близка к прямой. ТЭП типа ТХА хорошо работает в окислительных средах и сравнительно быстро разрушается в восстановительной среде.

*Хромель-копелевый преобразователь* (56 % Cu + 44 % Ni) ТЭП (тип ТХК) имеет градуировку ХК68. Эти ТЭП развивают наибольшую ТЭДС из всех стандартизованных ТЭП, что позволяет изготавливать измерительные комплекты с узкой температурной шкалой, например 0–300 °С.

Стандартные ТЭП типа ТХК и ТХА изготавливают из термоэлектродной проволоки диаметром от 0,7 до 3,2 мм.

*Вольфрам-рениевый преобразователь* (20 % рения, тип ВР-5/20) применяют для измерения температуры до 2 300 °С в нейтральной и восстановительной средах, а также для измерения температуры расплавленных металлов.

Иногда применяют и *нестандартизованные преобразователи*. Из них наиболее широко используют медь-копелевые, железо-константановые и медь-константановые ТЭП. Нестандартизованные ТЭП после изготовления подвергают обязательной индивидуальной градуировке.

Конструктивное оформление термоэлектрических преобразователей разнообразно и зависит главным образом от условий их применения. На рис. 6.18 показан ТЭП типичной конструкции. Как правило, рабочий спай промышленных ТЭП изготавливают сваркой в пламени вольтовой дуги. ТЭП из неблагородных металлов сваривают под слоем флюса, а ТЭП из платиновой группы — без флюса. Пайку применяют только при изготовлении нестандартизованных ТЭП из очень тонкой термоэлектродной проволоки.

Из специальных следует назвать многозонный ТЭП, применяемый для позонного измерения температуры в вертикальных аппаратах (в колоннах синтеза аммиака, метанола и др.).

Чехол такого ТЭП представляет собой трубу, в которую помещен пучок изолированных один от другого ТЭП различной длины.

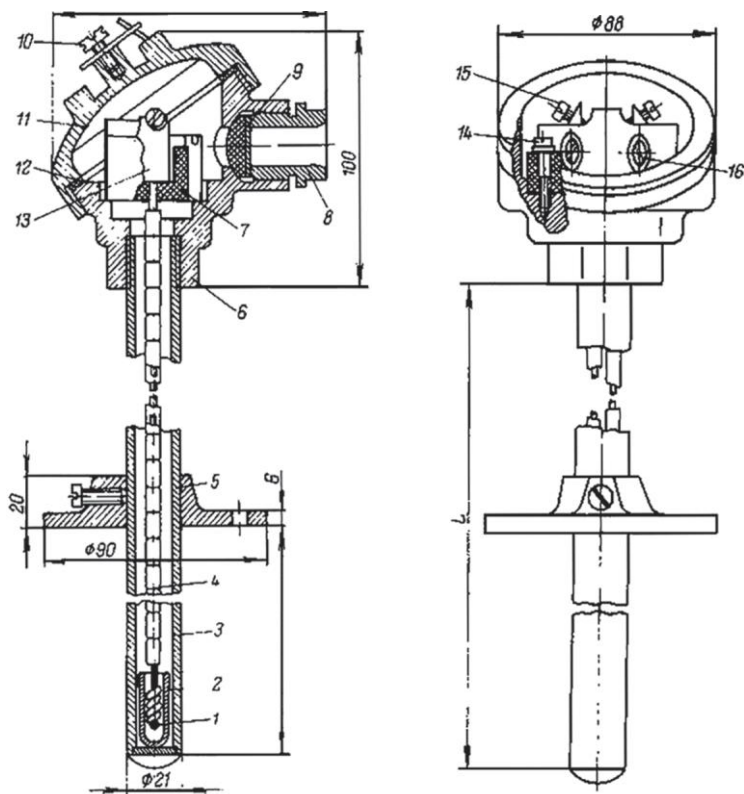


Рис. 6.18. Термопара в защитной арматуре с передвижным фланцем:  
 1 — горячий спай термопары; 2 — фарфоровый наконечник;  
 3 — защитная трубка; 4 — фарфоровые двухканальные бусы;  
 5 — передвижной фланец для крепления термопары;  
 6 — корпус головки; 7 — фарфоровая головка;  
 8 — штуцер для проводов; 9 — асбестовый шнур;  
 10 — винт для цепочки; 11 — крышка; 12 — прокладка; 13 — зажимы;  
 14 — винты для крепления колодки; 15 — винты для крепления  
 проводов; 16 — винты для крепления термоэлектродов в зажимах

Провода, соединяющие ТЭП с измерительным прибором, изготавливают из материалов, которые в паре между собой развивают те же ЭДС (при тех же температурах), что и ТЭП, к которому они подсоединены. Такое требование

ограничивается температурой примерно 100 °С, выше которой характеристики ТЭП и соединительных проводов могут различаться. Это допустимо, так как температура соединительных проводов обычно не бывает высокой. При соблюдении указанного требования провода удлиняют ТЭП на длину соединительных проводов, а свободные концы ТЭП оказываются на клеммах прибора, предназначенного для измерения ТЭДС.

Несоблюдение указанного выше требования привело бы к возникновению «паразитных» ЭДС в результате образования спаев в местах соединения свободных концов ТЭП с соединительными проводами. Например, для ТЭП типа ТХК применяют хромель-копелевые провода, а для ТЭП типа ТХА — один провод медный, а второй константановый (60 % Cu и 40 % Ni). Измерительные преобразователи для ТЭП рассмотрены выше.



Рис. 6.19 Термопара  
ТД729

Удобная для монтажа термопара ТД729 предназначена для измерения температуры в диапазоне от –150 до 800 °С. Корпус термопары выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, наружный диаметр корпуса 10 мм. Толщина стенки 2 мм. Корпус имеет штуцер М22 × 1,5. Рабочий спай изолирован относительно корпуса.

**Приборы для измерения термоэлектродвижущих сил.** Для измерения ТЭДС в комплектах термоэлектрических термометров применяют магнитоэлектрические милливольтметры и потенциометры.

Милливольтметры делятся на переносные и стационарные, а потенциометры — на лабораторные, переносные и автоматические. *Милливольтметры* — магнитоэлектрические

приборы, работа их основана на взаимодействии проводника, по которому течет ток, и магнитного поля постоянного магнита. Магнитная система милливольтметра (рис. 6.20) состоит из магнита, полюсных наконечников и цилиндрического сердечника. В кольцевом воздушном зазоре между полюсными наконечниками и сердечником вращается рамка из медного или, реже, алюминиевого изолированного провода. Чаще всего рамки крепятся на кернах, которые опираются на подпятники из агата или рубина. Момент, противодействующий вращению рамки, создается спиральными пружинками, которые одновременно служат и для подвода тока к рамке.

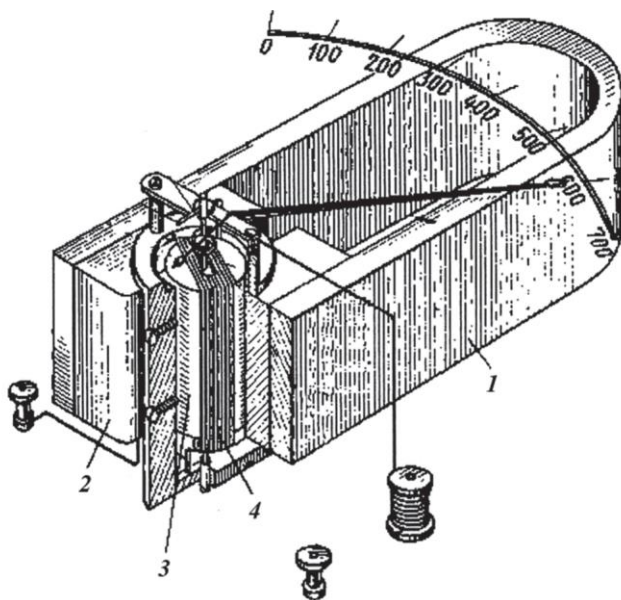
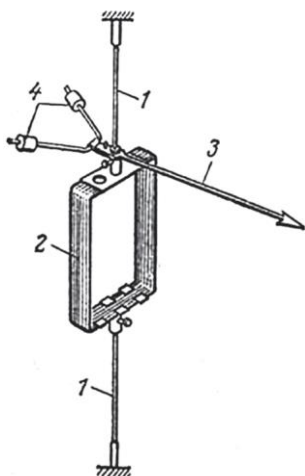


Рис. 6.20. Магнитная и подвижная системы милливольтметра:  
 1 — постоянный магнит; 2 — полюсный наконечник; 3 — сердечник;  
 4 — рамка





В регистрирующих приборах рамка подвешена на тонких металлических лентах (рис. 6.21). Грузиками подвижная система уравнивается так, что центр ее тяжести находится на оси рамки. Ток, протекая через рамку, вызывает появление двух одинаковых сил, направленных в разные стороны и стремящихся повернуть рамку.

Рис. 6.21. Схема крепления рамки на ленточных подвесках: 1 — лента подвеса; 2 — рамка; 3 — стрелка; 4 — грузики

Сила тока, протекающего по рамке, определяется ТЭДС термоэлектрического преобразователя  $E_m$  и сопротивлением электрической цепи  $R$ , т. е.

$$I = E_m / R. \quad (6.12)$$

Сопротивление цепи складывается из сопротивления ТЭП  $R_m$ , сопротивления соединительных проводов  $R_{cn}$  и сопротивления рамки  $R_p$ , т. е.

$$R = R_m + R_{cn} + R_p. \quad (6.13)$$

Следовательно, для угла поворота рамки получим

$$\varphi = K \cdot E_m / (R_m - R_{cu} + R_p). \quad (6.14)$$

Из уравнения (6.14) следует, что для получения однозначной зависимости угла поворота рамки со стрелкой от ТЭДС ТЭП  $E_m$  необходимо, чтобы сопротивление цепи оставалось всегда постоянным. Но если при стационарных условиях работы милливольтметра сопротивление рамки  $R_p$  можно считать практически постоянным, то сопротивление ТЭП  $R_l$  колеблется при изменении измеряемой температуры. Сопротивление соединительных проводов  $R_{cn}$  при изменении

температуры окружающей среды также приводит к появлению погрешности измерения.

Схема включения соединительных проводов показана на рис. 6.22.

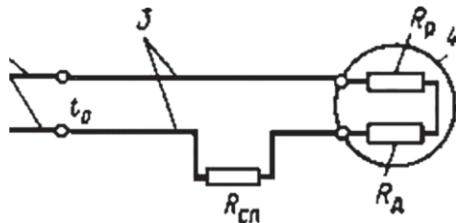


Рис. 6.22. Схема включения соединительных проводов:

1 — ТЭП; 2 — термоэлектродные провода;

3 — соединительные провода; 4 — прибор

Точность измерения температуры милливольтметром тем выше, чем большая часть сопротивления приходится на рамку и чем меньшие сопротивления имеют соединительные провода 3 и термоэлектродные провода 2 ТЭП. Для снижения указанной погрешности увеличивают сопротивление цепи последовательным подключением к рамке дополнительного сопротивления  $R_d$  в виде катушки из манганиновой проволоки (с практически неизменяющимся сопротивлением при изменении температуры). Практически сопротивление  $R_d$  в милливольтметрах колеблется от 100 до 500 Ом. Для получения правильных показаний действительное значение должно соответствовать расчетному. В приборах отечественного производства расчетная величина  $R_{вн}$  равна одному из следующих значений: 0,6; 1,6; 5; 15 и 25 Ом.

$$R_{вн} = R_T + R_{сп}. \quad (6.15)$$

Под это расчетное сопротивление, указанное на шкале милливольтметра, подгоняется при монтаже фактическое сопротивление ТЭП ( $R_T$ ) и сопротивление соединительных проводов.

Чтобы исключить погрешности, связанные с изменением сопротивления соединительных проводов и ТЭП при эксплуатации, температура соединительных линий должна быть близкой к 200 °С, а глубина погружения ТЭП должна соответствовать градуировочной. Если шкала милливольтметра выражена только в милливольтках, то к нему можно подключить термопару любой градуировки. Определив по шкале милливольтметра напряжение и зная величины  $R_0$  и  $R_{вн}$ , можно найти величины ТЭДС из уравнения

$$E_T = U_m (R_0 + R_{вн}) \cdot R_0, \quad (6.16)$$

где  $U_m$  — напряжение, измеряемой милливольтметром.

Зная  $E_T$ , по градуировочным таблицам для применяемого ТЭП определяют температуру. Если температура свободных концов ТЭП в процессе измерения изменяется в широких пределах, применяют метод компенсации температуры холостых спаев, используя для этого мостовую схему типа КТ-54 (рис. 6.23).

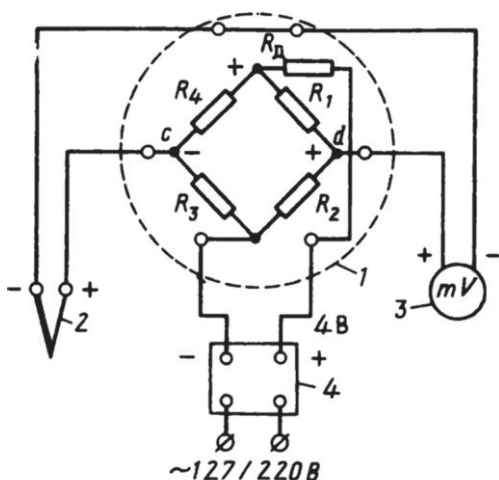


Рис. 6.23. Электрическая схема автоматической компенсации температуры холодных спаев: 1 — компенсационный мост; — ТЭП; 3 — милливольтметр; 4 — источник питания

ТЭП включается последовательно с неуравновешенным мостом, три плеча которого ( $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ ) выполнены из манганина, а четвертое ( $R_4$ ) — медное. Схема питается от стабилизированного источника питания.

Добавочное сопротивление  $R_0$  служит для подгонки напряжения, подаваемого на мост, до нужного значения. При постоянном напряжении источника питания (4 В), изменяя сопротивление  $R_0$ , можно настраивать мост для работы с ТЭП различных градуировок. От ТЭП до компенсационного моста прокладываются термоэлектродные провода, от моста до измерительного прибора — медные.

При градуировочной температуре холодных спаев ТЭП мост находится в равновесии и разность потенциалов на вершинах моста  $cd$  равна нулю. С изменением температуры холодных спаев одновременно изменяется сопротивление  $R_4$ , что нарушает равновесие моста, и на вершинах моста  $cd$  возникает разность потенциалов. Вследствие изменения температуры холодных спаев ТЭП одновременно изменяется его ТЭДС на величину указанной разности потенциалов. Так как изменение ТЭДС равно разности потенциалов и имеет противоположное направление, происходит автоматическая компенсация. Следовательно, компенсация может быть достигнута при условии равенства температур сопротивления  $R_4$  и холодных спаев ТЭП, что достигается размещением моста рядом с холодными спаями ТЭП.

При измерении температуры в нескольких местах одного и того же объекта применяют милливольтметры с многоточечными переключателями.

**Потенциометры.** Принцип действия потенциометров основан на уравнивании (компенсации) измеряемой ТЭДС с известной разностью потенциалов. Эта разность потенциалов создается в потенциометре посторонним источником энергии. Принципиальная схема потенциометра показана на рис. 6.24.

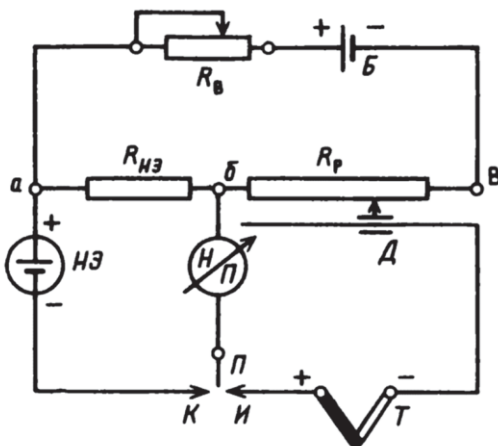


Рис. 6.24. Принципиальная схема потенциометра с постоянной силой тока в компенсационной цепи

В этой схеме имеются три электрические цепи. В цепь источника тока (компенсационную) входит источник тока  $B$ , регулировочное сопротивление  $R_{\text{в}}$  (реостат), постоянное сопротивление  $R_{\text{нэ}}$  и сопротивление реохорда  $R_{\text{р}}$  с перемещающимся вдоль него контактом  $D$ . В цепь нормального элемента входит нормальный элемент НЭ, сопротивление  $R_{\text{нэ}}$  и нулевой прибор НП. В цепь ТЭП входят ТЭП, нулевой прибор НП и часть измерительного сопротивления  $R_{\text{р}}$ . Нормальный элемент, предназначенный для контроля постоянства разности потенциалов между конечными точками реохорда, развивает постоянную во времени ЭДС.

Обычно применяют ртутно-кадмиевый гальванический элемент Вестона, развивающий при  $20^\circ\text{C}$  ЭДС  $1,01830\text{ В}$ . Пользуясь нормальным элементом, можно довольно точно установить постоянство разности потенциалов на концах реохорда. Для этой цели переключатель  $\Pi$  переводят на контакт  $K$ , включая НП в цепь НЭ и одновременно разрывая цепь ТЭП.

Нормальный элемент присоединяется к концам сопротивления  $R_{нэ}$  так, что его ЭДС оказывается направленной навстречу ЭДС источника тока  $B$ . Регулируя силу тока в компенсационной цепи реостатом  $R_6$ , добиваются такого положения, при котором разность потенциалов на концах сопротивления равна ЭДС НЭ. При этом сила тока в цепи нормального элемента равна нулю и стрелка НП устанавливается на нуле шкалы. В этом случае сила тока в компенсационной цепи

$$I_1 = \frac{E_{нэ}}{R_{нэ}}. \quad (6.17)$$

Для измерения ТЭДС ТЭП переключатель П переводят на контакт, подключая тем самым ТЭП последовательно с НП к измерительному сопротивлению в точке  $в$  и скользящему контакту. Термо-ЭДС ТЭП тогда будет действовать в сторону, противоположную ЭДС источника тока  $B$ .

Перемещая контакт  $D$ , находят такое его положение, при котором разность потенциалов между точками  $в$  и  $D$  измерительного сопротивления равна ТЭДС термопары, при этом сила тока в цепи ТЭП равна нулю, тогда

$$E_T = i \times R_{6D}. \quad (6.18)$$

Так как  $E_{нэ}$  и  $R_{нэ}$  постоянны, определение ТЭДС ТЭП сводится к определению участка измерительного сопротивления  $R_{6D}$ . Измерение ТЭДС компенсационным методом осуществляется в отсутствие тока в цепи термоэлектротеплопреобразователя, поэтому сопротивление цепи ТЭП, соединительных проводов, НП, а следовательно, и его зависимость от температуры не оказывают влияния на точность измерения.

Это свойство является одним из существенных преимуществ компенсационного метода измерения. Промышленность выпускает большое количество переносных технических и лабораторных потенциометров различных типов. В зависимости от назначения и точности показаний они

подразделяются на три класса: 1, 2 и 3. Потенциометры 1-го и 2-го классов снабжены свидетельством с указанием их погрешностей и используются в качестве образцовых. Потенциометры 3-го класса используются как рабочие.

В автоматических потенциометрах в отличие от рассмотренных выше взамен стрелочного нулевого прибора установлены электронные нуль-индикаторы. Автоматические электронные потенциометры работают в комплекте с одним из стандартных ТЭП. Измерительные схемы всех автоматических потенциометров предусматривают автоматическое введение поправки на температуру свободных концов ТЭП. Поэтому их выполняют в виде неуравновешенного моста.

Все сопротивления измерительной схемы (рис. 6.25), кроме  $R_k$ , выполнены из манганина, сопротивление  $R_k$  — из меди или никеля. Цепь источника тока состоит из двух ветвей: рабочей, в которую включен реохорд  $R_p$ , и вспомогательной, состоящей из двух сопротивлений,  $R_{нэ}$  и  $R_k$ . Наличие вспомогательной ветви позволяет автоматически ввести поправку на температуру холодных спаев термопары. Сопротивление  $R_k$  и холодные спаи термопары должны находиться при одинаковой температуре. В приборе сопротивление  $R_k$  расположено недалеко от места подключения термопар.

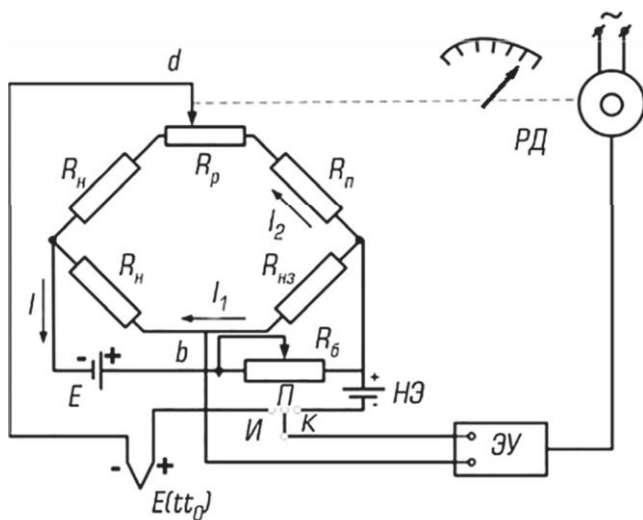


Рис. 6.25. Принципиальная схема электронного автоматического потенциометра

Измеряемая ТЭДС ТЭП компенсируется падением напряжения на сопротивлении  $R_p$ , зависящего от положения движка реохорда, и сопротивлениях  $R_H$  и  $R_K$

$$E_m = I_2 R_p + I_2 R_H - I_1 R_K. \quad (6.19)$$

Повышение температуры холодных спаев вызывает уменьшение ТЭДС ТЭП на величину  $E_{Ti}$ . При этом падение напряжения на сопротивлении  $R_K$  одновременно возрастает, тогда

$$E_T - E_{Ti} = I_2 R_p + I_2 R_H - I_1 (R_K + \Delta R_K). \quad (6.20)$$

Чтобы движок реохорда сохранил свое положение и потенциометр показывал измеряемую температуру, необходимо обеспечить равенство

$$E_{m1} = I_1 \Delta R_K. \quad (6.21)$$

Если ТЭДС ТЭП  $E_m$  не равна падению напряжения  $U_{bd}$ , то напряжение небаланса  $E_m - U_{bd}$  подается на вход преобразовательного каскада.



В преобразовательном каскаде постоянное напряжение небаланса преобразуется в переменное, которое затем усиливается до значения, достаточного для вращения реверсивного двигателя  $PД$ , который передвигает движок реохорда и восстанавливает равновесие измерительной схемы. Одновременно  $PД$  перемещает показывающую стрелку и записывающее перо. При равновесии измерительной схемы, когда  $E_m = U_{bd}$ , реверсивный двигатель не вращается, так как на вход преобразовательного каскада напряжение не подается.

Чтобы установить силу рабочего тока  $I_l$ , переключатель  $П$ , нормально находящийся в положении  $И$  (измерение), нажатием кнопки механизма установки рабочего тока переводится в положение  $К$  (контроль). При этом одновременно устанавливается кинематическая связь реверсивного двигателя с движком реостата  $R_\phi$  и подключается электронный усилитель к цепи нормального элемента.

Если падение напряжения  $I_l R_{нэ}$  не равно ЭДС нормального элемента, то электронный усилитель, как при измерении ТЭДС ТЭП, получает сигнал, равный разности между ЭДС нормального элемента и падением напряжения на сопротивление  $R_{нэ}$ . Реверсивный двигатель, вращаясь по часовой стрелке или против нее, в зависимости от знака небаланса, передвигает движки реостата  $R_\phi$ , изменяя величину питающего напряжения. В момент равновесия, когда  $I_l = E_{нэ} / R_{нэ}$ , на электронный усилитель сигнал не подается, и реверсивный двигатель останавливается. В этот момент устанавливается вполне определенное значение силы рабочего тока  $I_r$ .

В электронных потенциометрах для усиления напряжения небаланса применяют электронные усилители переменного тока.

Приборостроительные заводы нашей страны выпускают много разновидностей электронных автоматических потенциометров.

## § 6.5. Пирометры излучения

Пирометры излучения основаны на измерении лучистой энергии, испускаемой нагретым телом. Наибольшее распространение пирометры излучения получили в металлургии, однако и в химической промышленности они находят некоторое применение (печи, топки котельных установок и др.).

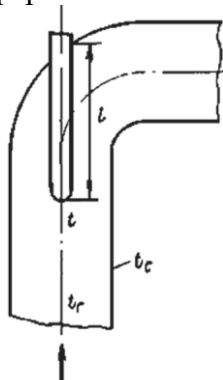
Пирометры излучения по сравнению с другими приборами измерения температуры имеют следующие преимущества:

- а) измерение осуществляется бесконтактным способом, следовательно, отсутствует искажение температурного поля, вызванное введением датчика прибора в измеряемую среду;
- б) верхний предел измерения температуры теоретически не ограничен;
- в) возможность измерения высоких температур газовых потоков при больших скоростях.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучаемого тела электромагнитными волнами. При поглощении электромагнитных волн от излучающего тела другими телами электромагнитные волны вновь превращаются в тепловую энергию. Тела излучают электромагнитные волны широкого диапазона длин от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ .

Большинство твердых и жидких тел обладают непрерывным спектром излучения, т. е. излучают волны всех длин. Другие тела (чистые металлы и газы) обладают селективным спектром излучения, т. е. излучают волны только на определенных участках спектра. Участок начиная от волн длиной  $\lambda$  от 0,4 до 0,76 мкм соответствует видимому спектру. Каждая длина волны видимого спектра соответствует определенному цвету. Волны длиной  $\lambda$  от 0,4 до 0,44 мкм соответствуют

темно-фиолетовому цвету; от 0,44 до 0,49 мкм — синеголубому; от 0,49 до 0,59 мкм — темно- и светло-зеленому; от 0,58 до 0,63 мкм — желто-оранжевому; от 0,63 до 0,76 мкм — светло- и темно-красному. Выделение определенных цветов в известной мере условно, так как в сплошном видимом спектре переход от одного цвета к другому происходит непрерывно.



*Рис. 6.26. Положение чувствительного элемента измерителя в трубе*

Волны длиной  $\lambda = 0,76$  мкм относятся к невидимым инфракрасным тепловым лучам. По мере повышения температуры нагретого тела и изменения его цвета быстро возрастает спектральная энергетическая яркость (СЭЯ), т. е. излучение определенной длины волны (яркости), а также заметно увеличивается суммарное (интегральное) излучение. Указанные свойства нагретых тел используют для измерения их температуры. В соответствии с этими свойствами пирометры излучения делятся на квазимонохроматические, спектрального отношения и полного излучения.



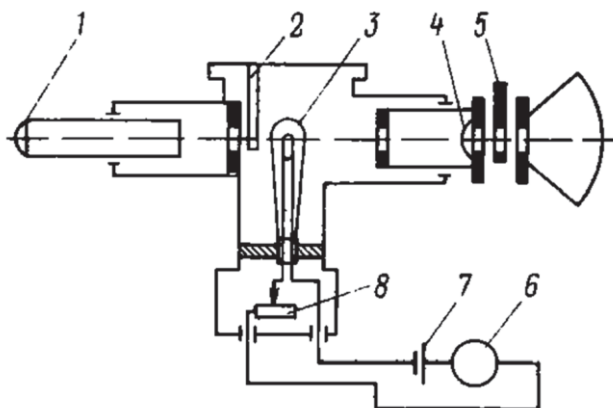
*Рис. 6.27. Пирометр  
«Кельвин  
Компакт 1000»*

Профессиональный пирометр «Кельвин Компакт 1000» предназначен для контроля теплового режима оборудования (электрораспределительных устройств, промышленных печей, двигателей, редукторов, букс железнодорожных вагонов и т. п.), а также для измерения температуры в технологических процессах металлургии, машиностроения, нефтехимии в диапазоне от  $-50$  до  $+1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  с точностью  $\pm 1\%$  и сертифицирован для использования при температуре окружающей среды от  $-40$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Прибор имеет одно из лучших в своем классе соотношений площади пятна измерения к расстоянию до объекта, равное 1:100; для получения наиболее достоверных результатов имеется ручная регулировка коэффициента излучения материалов от 0,01 до 1,00. Для точного наведения имеется встроенный лазерный целеуказатель, а для контроля теплового режима имеется функция задания максимальной и минимальной температур, при превышении которых происходит звуковое и визуальное оповещение. Корпус пирометра изготовлен из металла и имеет эргономичные прорезиненные накладки. Питание прибора «Кельвин Компакт 1000» осуществляется от двух батарей типа «АА», для экономии заряда и комфортного отображения результатов предусмотрена автоматическая регулировка яркости дисплея.

**Квазимонохроматические пирометры.** Действие квазимонохроматических (оптических) пирометров основано на сравнении яркости монохроматического излучения двух тел: эталонного и тела, температуру которого намеряют. В качестве эталонного тела обычно используют нить лампы накаливания, яркость излучения которой регулируется.

Наиболее распространенным представителем этой группы является монохроматический оптический пирометр с исчезающей нитью, принципиальная схема которого приведена на рис. 6.28.



*Рис. 6.28. Схема квазимонохроматического (оптического) пирометра*

Пирометр представляет собой телескопическую трубку с линзой 1 объектива и линзой 4 окуляра. Внутри телескопической трубки в фокусе линзы объектива находится пирометрическая лампа накаливания 3 с подковообразной нитью. Лампа питается от аккумулятора 7 через реостат 8. В цепь питания пирометрической лампы включен милливольтметр 6, конструктивно объединенный с трубкой телескопа. Шкала милливольтметра градуирована в градусах температуры. Для получения монохроматического света окуляр снабжен красным светофильтром 5, пропускающим только лучи определенной длины волны. В объективе находится серый поглощающий светофильтр 2, служащий для расширения пределов измерения.

При подготовке оптической системы к измерению трубки наводят на тело и передвигают объектив до получения четкого, ясного изображения тела и нити лампы (в виде резкой черной подковки). Включив источник тока, реостатом регулируют яркость нити до тех пор, пока средняя часть ее не сольется с освещенным телом. В этот момент по шкале милливольтметра отсчитывают температуру тела.

Приборостроительная промышленность выпускает переносные оптические пирометры с исчезающей нитью в различном конструктивном оформлении для температур от восьмисот до нескольких тысяч градусов. Пирометры работают с эффективной длиной волны  $\lambda$ , равной 0,65 или 0,66 мкм.

**Фотоэлектрические пирометры.** В этих пирометрах чаще всего используют фотоэлементы с внешним фотоэффектом, в которых возникает электрический ток (фототок), пропорциональный падающему на него световому потоку или, точнее, пропорциональный энергии излучения волн определенного участка спектра.

Фототок, создаваемый фотоэлементами, может непосредственно служить мерой температуры измеряемого тела. Такие приборы не отличаются высокой точностью. Более совершенны приборы, фотоэлемент которых используется в нулевом режиме как устройство для сравнения двух источников излучения: измеряемого тела и регулируемого источника света.

В фотоэлектрических пирометрах типа ФЭП (рис. 6.29) изображение измеряемого раскаленного тела при помощи объектива 1 и диафрагмы 2 создается в плоскости одного из отверстий диафрагмы 3, расположенной перед фотоэлементом 5. Через другое отверстие диафрагмы 3 фотоэлемент освещается регулируемым источником света — электрической лампой 6. Перед фотоэлементом расположен красный светофильтр 4.

Фотоэлемент поочередно с частотой 50 Гц освещается то измеряемым телом, то лампой. Поочередность освещения создается колеблющейся заслонкой 8 модулятора света 7 вибрационного типа. Оба световых потока, попадающие на фотоэлемент, изменяются в противофазе по синусоидальному закону, что достигается специальным профилированием заслонки и отверстий.

На выходе фотоэлемента возникает фототок, величина которого определяется освещенностью от тела и лампы. При неравенстве этих освещенностей в цепи фотоэлемента возникает переменная фототока, совпадающая по фазе либо с фототоком от тела, либо с фототоком от лампы. Переменная составляющая фототока усиливается электронным усилителем 9, имеющим фазочувствительную схему.

Выходной сигнал усилителя управляет цепью питания лампы 6. Сила тока накала лампы будет изменяться до тех пор, пока освещенности от измеряемого тела и лампы не уравниваются и переменная составляющая фототока не станет равной нулю. Тем самым сила тока в лампе окажется однозначно связанной с яркостной температурой измеряемого тела. Сила тока, питающего лампу, измеряется быстродействующим автоматическим потенциометром по величине падения напряжения на сопротивлении  $R_{вх}$  в цепи лампы. Потенциометр градуируют в градусах яркостной температуры. При измерениях температуры выше допустимой для лампы 6 (1 400–1 500 °С) вводится ослабляющий светофильтр, что позволяет довести предел измерения до 4 000 °С.

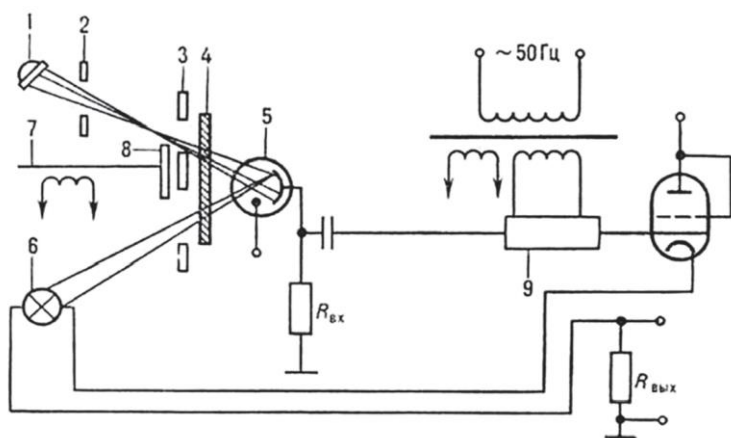


Рис. 6.29. Упрощенная схема фотоэлектрического пирометра типа ФЭП

Пирометры типа ФЭП выпускаются одношкальными для измерений температур от 600 до 2 000 °С или двухшкальными для измерения более высоких температур.

**Пирометры спектрального отношения.** В пирометрах спектрального отношения (цветовых), применяемых для промышленных измерений, определяется отношение СЭЯ реального тела в лучах с двумя заранее выбранными значениями длины волны. Это отношение для каждой температуры различно, но вполне однозначно.

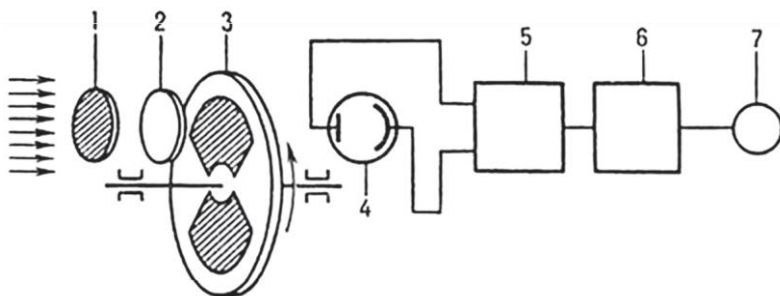
В большинстве случаев для реальных тел кривые  $E_\lambda = f(\lambda)$  при различных температурах совершенно подобны кривым для абсолютно черного тела, поэтому практически не требуется вводить поправки на неполноту излучения, что является основным преимуществом цветковых пирометров. Принципиальная схема цветового пирометра с фотоэлементом показана на рис. 6.30.

Измеряемое излучение через защитное стекло 1 и объектив попадает на фотоэлемент 4. Между объективом и фотоэлементом установлен обтюратор 3, вращаемый синхронным двигателем. Обтюратор выполнен в виде диска с двумя отверстиями, одно из которых закрыто красным светофильтром К, другое — синим С. При вращении обтюратора на фотоэлемент попеременно попадают излучения через красный или синий светофильтр. Спектральная характеристика фотоэлемента зависит от температуры, поэтому фотоэлемент в пирометре заключен в термостат с автоматическим регулированием.

Электрический ток, напряжение которого пропорционально соответствующим интенсивностям излучения, предварительно усиливается электронным усилителем 5 и преобразуется специальным электронным логарифмическим устройством 6 в постоянный ток, величина которого зависит от отношения I/T. Выходной ток логарифмирующего устройства измеряется указывающим или



регистрирующим милливольтметром 7. Пределы измерения пирометра — от 1 400 до 2 500 °С; основная погрешность при измерении температуры физических тел не превышает  $\pm 1$  % от верхнего предела измерений.



*Рис. 6.30. Схема пирометра спектрального отношения*

## **ТЕМА № 7**

### **Контроль качества и состава материалов**

#### **§ 7.1. Основные понятия**

В химической и смежных отраслях промышленности технологические процессы связаны с получением и переработкой многих газообразных и жидких веществ. Эти вещества характеризуются различными показателями, по которым оценивают их качество.

При измерении состава сред объект измерения рассматривают как смесь, состоящую из нескольких (не менее двух) элементов, называемых *компонентами*. Под *измерением состава* понимают определение доли (концентрации) того или иного компонента в смеси. При определении концентрации одного компонента (даже если в смеси помимо определяемого компонента присутствует еще несколько) смесь называют *бинарной* (двойной); когда определяют концентрации нескольких веществ, смесь называют *многокомпонентной*.

Количественно состав характеризуют отношением количества определяемого компонента к количеству всей взятой пробы и выражают в соответствии с РД 50-294–81 в массовой, объемной и молярной долях, т. е. в отношении массы, объема или количества вещества определяемого компонента соответственно к массе, объему или количеству вещества анализируемой пробы или в массовой и молярной концентрациях (отношениях массы или количества вещества к объему анализируемой пробы).

По ГОСТ 8.417–81 единицы измерения первых трех величин безразмерны: доля (без обозначения), процент (обозначение: %), тысячная доля (обозначение: русское тыс.<sup>-1</sup>, латинское рт) и миллионная доля (обозначение: русское млн<sup>-1</sup>, латинское ррт) единица измерения массовой

концентрации — килограмм на метр кубический (обозначение  $\text{кг/м}^3$ ) и дольные от нее единицы:  $\text{г/м}^3$ ,  $\text{мг/м}^3$ ,  $\text{г/см}^3$ ,  $\text{г/мл}$ ; единица молярной концентрации — моли на метр кубический (обозначение русское моль/ $\text{м}^3$ , моль/ $\text{мл}$ ).

Методы анализа состава вещества подразделяют на *избирательные* и *интегральные*. Избирательные методы позволяют избирательно (однозначно) получать информацию о количестве конкретного компонента в смеси. В интегральных или неизбирательных методах результаты измерения отражают количество некоторой группы веществ в смеси.

*Газоанализатор* — прибор, предназначенный для получения информации о значении концентрации измеряемого компонента или суммы компонентов в анализируемой газовой смеси.

*Анализируемая смесь* — смесь газов и паров, которая должна быть проанализирована, т. е. должен быть определен ее качественный и количественный состав, или же в которой должны быть определены концентрации отдельных ее компонентов.

*Измеряемый компонент* — один из газов, входящих в газовую смесь, подлежащий количественному определению.

*Нулевой газ* — газ, который при прохождении через газоанализатор не вызывает отклонения указателя показывающего прибора.

*Поверочная газовая смесь (ПГС)* — смесь нулевого газа с известным количеством измеряемого компонента, применяемая для градуировки и поверки газоанализатора.

Газоанализаторы, используемые для контроля и регулирования технологических процессов, градуируют в единицах объемной доли, а для высокоточных измерений — в единицах молярной доли. Газоанализаторы, которые применяют для контроля воздушной среды, градуируют в единицах массовой концентрации ( $\text{кг/м}^3$ ,  $\text{мг/м}^3$ ,  $\text{мг/л}$ ).

*Предельно допустимая концентрация (ПДК)* — концентрация токсичных веществ, содержащихся в воздухе, которая при ежедневном воздействии в течение неограниченно продолжительного времени не может вызвать у работающих профессиональных заболеваний.

## **§ 7.2. Измерение концентрации растворов**

Для контроля концентрации растворов наиболее широкое применение нашли следующие методы:

- кондуктометрический, основанный на измерении электропроводности электролитов;
- оптический, основанный на изменении оптических свойств жидкостей в зависимости от концентрации определяемого вещества;
- электрометрический, основанный на измерении разности потенциалов специальных электродов, погруженных в контролируемую среду, и зависящий от ее кислотности или щелочности (рН-метрия).

**Кондуктометрический метод.** Измерение концентрации растворов электролитов по их электропроводности (кондуктометрия) широко применяют как в лабораторной практике, так и при определении зависимости удельной электропроводности электролитов от концентрации для непрерывного автоматического контроля в промышленных условиях.

При использовании кондуктометрического метода анализа мерой концентрации раствора является электропроводность. Для оценки электропроводности растворов различных веществ В. Кольрауш ввел понятие *эквивалентной электропроводности*, которая определяется как электропроводность раствора, содержащего 1 грамм-эквивалент вещества на 1 см<sup>3</sup> раствора:

$$\lambda = \sigma / \eta, \quad (7.1)$$

где  $\lambda$  — эквивалентная электропроводность раствора;  
 $\sigma$  — удельная электропроводность раствора, См/см;  
 $\eta$  — эквивалентная концентрация растворенного вещества, г-экв/см<sup>3</sup>.

Эквивалентная электропроводность всех электролитов увеличивается по мере разбавления раствора вследствие увеличения диссоциации. Предельного значения она достигает при полной диссоциации (т. е. при бесконечном разбавлении). Зависимость между удельной электропроводностью раствора, природой растворенного электролита и его концентрацией определяется законом Кольрауша:

$$\sigma = \alpha \eta (v_k - v_a),$$

где  $v$  — подвижность ионов (катионов  $v_k$  и анионов  $v_a$ ) при бесконечном разбавлении, т. е. скорость их перемещения в электрическом поле с градиентом напряжения 1 В/см, выраженная в см/с;  
 $\alpha$  — степень электролитической диссоциации.

На рис. 7.1 показана зависимость удельной электропроводности от концентрации, характерная для большинства сильных электролитов. При увеличении концентрации удельная электропроводность раствора сначала быстро возрастает, достигая некоторой максимальной величины, зависящей от природы электролита, а затем уменьшается. Следовательно, для получения однозначной зависимости электропроводности от концентрации необходимо производить измерения в пределах концентраций, расположенных с одной стороны от максимума. Из рассмотрения зависимостей видно, что кривые слева от максимума имеют большую крутизну. Следовательно, в этой области концентраций кондуктометрический метод имеет наибольшую чувствительность. Кроме того, в значительной области

измерения концентраций как слева, так и справа от максимума зависимости близки к линейным.

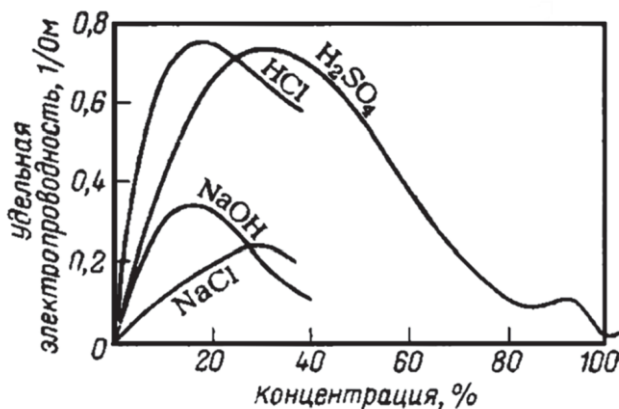


Рис. 7.1. Зависимости удельной электропроводности электролитов от концентрации

В электродной кондуктометрии применяют измерительные ячейки, состоящие из двух электродов, установленных на определенном расстоянии один от другого в сосуде с контролируемым раствором. Измерительная ячейка (рис. 7.2) характеризуется электрическим сопротивлением (в Ом):

$$R = (I / \sigma) (L / S), \quad (7.3)$$

где  $S$  — площадь электродов;

$L$  — расстояние между электродами;

$\sigma$  — удельная электрическая проводимость раствора.

В практике кондуктометрических измерений это отношение получило название константы измерительной ячейки  $K$ , которую определяют из опыта. Электропроводность можно измерять, используя как постоянный, так и переменный ток промышленной или повышенной частоты.

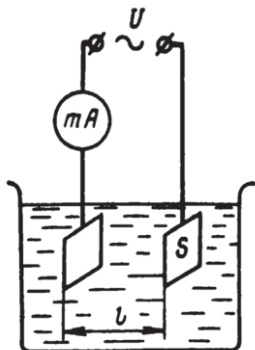


Рис. 7.2. Двухэлектродная измерительная ячейка

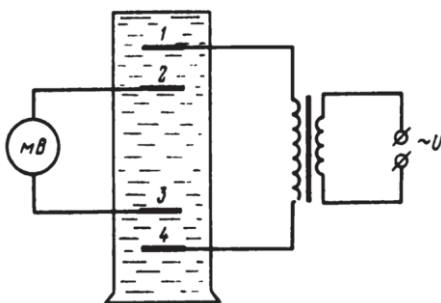


Рис. 7.3. Четырехэлектродная измерительная ячейка

Большинство отечественных промышленных кондуктометров работают на токе промышленной частоты. Наряду с двухэлектродной измерительной ячейкой, которую применяют в большинстве кондуктометрических концентраторов, используют ячейки с четырьмя электродами (рис. 7.3). В этой ячейке два электрода являются токовыми, к ним подводится напряжение от внешнего источника, и между ними через раствор протекает ток. Два других электрода представляют собой потенциометрические зонды, которыми измеряется падение напряжения в определенном объеме контролируемого раствора. Падение напряжения пропорционально сопротивлению контролируемого раствора, т. е. его концентрации. Использование такой ячейки и компенсационного метода измерения напряжения позволяет почти полностью избавиться от влияния поляризации на получаемые результаты и практически устранить возникновение емкостной составляющей при измерении. Это обусловлено тем, что индикаторные электроды освобождены от токовой нагрузки и все связанные с ней побочные электрохимические процессы происходят на токовых электродах.

При использовании четырехэлектродной ячейки в качестве измерительных приборов служат серийные автоматические потенциометры. Схема кондуктометра с использованием уравновешенной мостовой измерительной схемы показана на рис. 7.4.

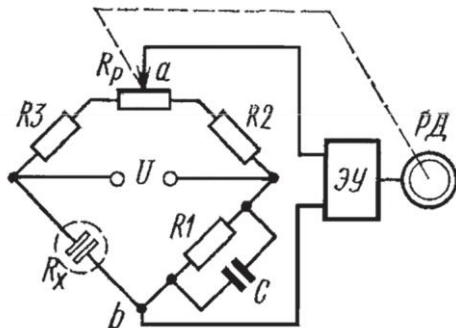


Рис. 7.4. Схема кондуктометра с уравновешенной мостовой измерительной схемой

В два смежных плеча моста включены постоянное сопротивление  $R_1$  и сопротивление измерительной ячейки  $R_x$ . В два других плеча наряду с постоянными сопротивлениями  $R_2$  и  $R_3$  включен реохорд  $R_p$  для уравнивания моста.

Напряжение с диагонали моста  $ab$  подается на вход электронного усилителя ЭУ, выполняющего функции нуля-индикатора. Если мостовая схема находится в равновесии, сигнал на входе электронного усилителя равен нулю и включенный на его выходе реверсивный двигатель РД остается неподвижным. При изменении концентрации контролируемого раствора изменяется сопротивление измерительной ячейки и мост разбалансируется. Сигнал разбаланса, пропорциональный изменению концентрации, поступает на вход усилителя ЭУ и после усиления — на реверсивный двигатель. Двигатель перемещает движок реохорда до наступления нового состояния равновесия мостовой схемы.



При изменении температуры электролита изменяется на 1,5–2,5 % его удельная электропроводность. Температура большинства технологических растворов изменяется в довольно значительных пределах, поэтому все промышленные кондуктометрические концентратометры имеют автоматические компенсаторы влияния температуры контролируемых растворов на результаты измерений.

**Оптические методы.** Эти методы анализа растворов нашли широкое применение в химической промышленности. Они универсальны и высокочувствительны. Из большого числа оптических методов рассмотрим лишь основные.

*Колориметрический метод* количественного анализа основан на свойстве окрашенных растворов неодинаково поглощать проходящий через них поток света. Количественные соотношения определяются законом Ламберта — Бера.

Фотоэлектрические колориметры предназначены для работы в видимом участке спектра. Концентрация измеряется по интенсивности окраски анализируемого вещества, отсюда и название приборов («колор» — цвет). Чтобы увеличить чувствительность и избирательность измерений, в фотоколориметрах широко применяют светофильтры. Для регистрации интенсивности световых потоков в фотоэлектрических колориметрах в качестве приемников используют фотоэлементы, фотосопротивления и фотоумножители различных типов.

В автоматических фотоколориметрах обычно применяют двухканальные (дифференциальные) схемы. Эти схемы не чувствительны к колебаниям источника света, внешней освещенности и температуры, так как измерения производятся сравнительным методом. В двухканальных фотоколориметрах (рис. 7.5) сравниваются величины фототоков двух фотоэлементов, при этом один из токов пропорционален прошедшему через контролируемый раствор

световому потоку, а другой — световому потоку, прошедшему через эталонный раствор.

При равенстве оптических свойств эталонной и исследуемой жидкостей освещенность обоих фотоэлементов одинакова и ток в диагонали моста отсутствует. Если концентрация исследуемой жидкости отличается от эталонной (жидкость слабее или сильнее окрашена), то в диагонали моста появляется ток, величина которого функционально зависит от концентрации.

*Рефрактометрический метод* использует зависимость коэффициента преломления света, проходящего из воздуха в контролируруемую среду, от концентрации анализируемого компонента в последней.

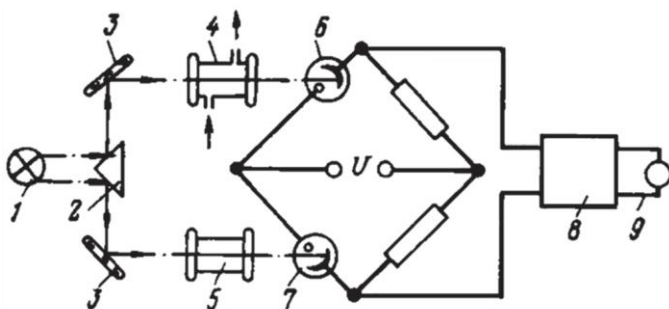


Рис. 7.5. Принципиальная схема фотокolorиметра

Существует несколько методов определения показателя преломления, основными из которых являются спектрометрический метод и метод полного внутреннего отражения.

*Спектрометрический метод* основан на определении показателя преломления по углу наименьшего отклонения светового потока в стеклянных призмах, заполненных контролируемым раствором. На рис. 7.6 показана принципиальная схема автоматического рефрактометра, в котором используется кювета дифференциального типа. Луч от источника

света  $1$  проходит через конденсорную линзу  $2$ , диафрагму  $3$  и попадает в кювету  $4$ . Если концентрация контролируемого раствора равна концентрации сравнительного раствора, то луч проходит через кювету без отклонения и равномерно освещает оба фотосопротивления  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . При этом сигнал на выходе равен нулю. При изменении концентрации анализируемого раствора луч света отклоняется в ту или иную сторону, и равенство освещенностей фотосопротивлений нарушается.

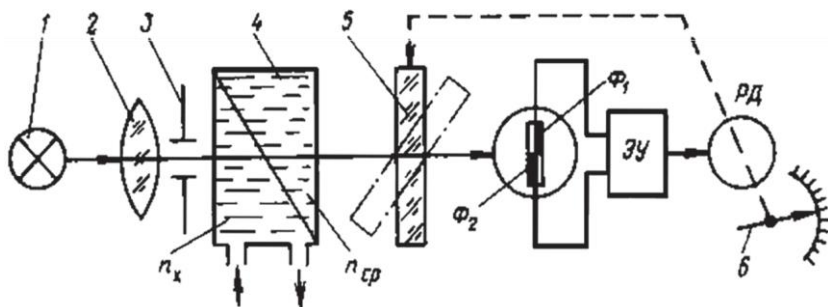


Рис. 7.6. Принципиальная схема автоматического рефрактометра

В результате этого на вход электронного усилителя ЭУ подается сигнал, знак и величина которого определяются отклонением концентрации контролируемого раствора от концентрации сравнительного раствора. Этот сигнал усиливается в ЭУ и приводит во вращение реверсивный двигатель РД, который через систему передач поворачивает компенсационную пластину  $5$  до тех пор, пока равенство освещенностей не восстановится. При этом угол поворота пластины и связанной с ней отсчетной системы  $6$  прибора пропорционален изменению концентрации контролируемого раствора. Изменяя толщину пластины  $5$ , можно изменять пределы измерения прибора.

Кювета  $4$ , состоящая из двух камер, автоматически обеспечивает температурную компенсацию результатов измерения, если сравнительная (эталонная) жидкость имеет тот же

температурный коэффициент показателя преломления, что и контролируется.

**Поляриметрический метод.** Этот метод определения концентрации основан на свойстве некоторых оптических активных веществ вращать плоскость поляризации проходящего через них поляризованного света.

Для растворов, содержащих оптически активные вещества, угол вращения плоскости поляризации пропорционален концентрации при постоянной толщине слоя раствора.

$$a = a_0 / C, \quad (7.8)$$

где  $a_0$  — удельное вращение плоскости поляризации, зависящее от температуры и длины волны поляризованного света.

Таким образом, зная величину  $a_0$ , по измеренному значению угла вращения можно определить концентрацию  $C$ .

На рис. 7.7 показана принципиальная схема автоматического поляриметра. Обозначение  $\uparrow E$  выражает состояние поляризации в разных точках оптической системы в положении баланса.

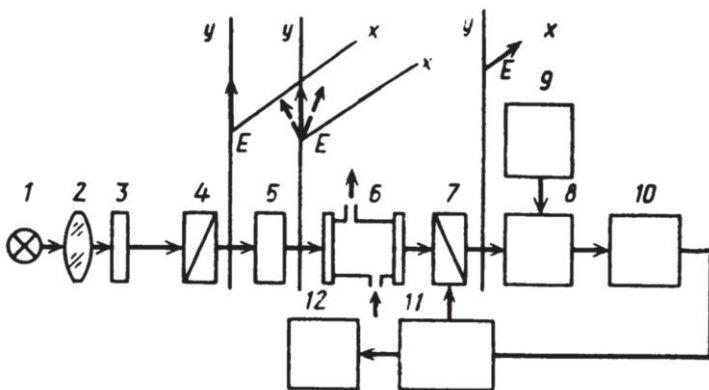


Рис. 7.7. Принципиальная схема автоматического поляриметра

Излучение от источника света 1, сформированное линзой 2 в пучок, близкий к параллельному, пройдя интерференционный фильтр 3, становится монохроматическим. Поляризатор 4 превращает это излучение в линейно поляризованное с определенным азимутом. Модулятор 5 (например, ячейка Фарадея) изменяет азимут поляризации с частотой  $f$  на одинаковую величину от среднего положения. Анализатор 7 установлен в скрещенное положение, т. е. под углом  $90^\circ$  к среднему положению азимута поляризации, и на фотоприемник 8 поступает излучение с амплитудной модуляцией удвоенной частоты ( $2f$ ) изменения азимута поляризации. Фотоприемник преобразует излучение в электрический сигнал. Питание фотоприемника осуществляет блок питания 9.

Если между модулятором и анализатором поместить оптически активный объект 6, то среднее положение азимута поляризации будет повернуто на определенный угол  $\alpha$ , и на фотоприемник поступит излучение частоты  $f$ . Электрический сигнал частоты вызовет в электронной системе 10 сигнал рассогласования, который поступит в исполнительный механизм 11, имеющий жесткую связь с анализатором. В зависимости от фазы сигнала рассогласования исполнительный механизм будет поворачивать анализатор в ту или иную сторону вокруг оптической оси системы. Это будет продолжаться до тех пор, пока вновь не установится скрещенное положение и частота излучения за анализатором не станет равна  $2f$ . Угол поворота анализатора равен углу вращения азимута поляризации оптически активным объектом. Результат измерения виден на отсчетном устройстве 12, связанном с анализатором через исполнительный механизм. Поляризационно-оптические методы практически безынерционны и обладают высокой точностью.



*Рис. 7.88. Фотометрический мультиметр «Технофам-002.3»*

Фотометрический мультиметр «Технофам-002.3» — профессиональное решение для измерения оптической плотности, коэффициентов пропускания и концентрации веществ в жидкостях.

Лабораторные концентратометры используются в лабораториях химического контроля на предприятиях теплоэнергетики, пищевых, химических, фармацевтических и иных производствах.

Фотометрический мультиметр «Технофам-002.3» предназначен для измерения коэффициентов пропускания, оптической плотности и концентрации веществ в жидкостях согласно сертифицированным методам пробоподготовки, обеспечивающим окраску анализируемой жидкости пропорционально концентрации определяемого вещества.

Концентрация растворенных веществ определяется по интенсивности изменения окраски растворов при проведении специфических для данного вещества химических реакций.

### **§ 7.3. Измерение концентрации водородных ионов в растворах (рН-метрия)**

Кислотность и щелочность любых водных растворов кислот и щелочей можно выразить в функции концентрации водородных ионов. Концентрацию водородных ионов определяют по величине потенциала, возникающего на границе различных электродов, опущенных в раствор. Даже в самой чистой воде всегда имеются водородные и гидроксильные ионы, что определяет электропроводность чистой воды.

Так как распад молекул воды на ионы незначителен, концентрацию водородных ионов можно считать постоянной. Поэтому

$$[H^+] [OH^-] = R [H_2O] = R_{H_2O} = const.$$

Опытами установлено, что при  $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  константа диссоциации  $\text{Rn}_2\text{O} = 10^{-14}$ , т. е. для чистой воды в любых нейтральных растворах (в кмоль/л)

$$[H^+] = [OH^-] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}. \quad (7.9)$$

При растворении в воде кислоты концентрации  $H^+$  увеличивается, а концентрация  $OH^-$  становится соответственно меньше, чем в нейтральном растворе. При растворении щелочей, наоборот, увеличивается концентрация  $OH^-$  и уменьшается содержание  $H^+$ . Поэтому в кислотных растворах  $H^+ > 10^{-7}$ , а в щелочных  $H^+ < 10^{-7}$ .

На практике концентрацию водородных ионов численно принято характеризовать отрицательным логарифмом концентрации  $H^+$ , так называемым водородным показателем pH:

$$pH = -\lg [H^+]. \quad (7.10)$$

При этом нейтральная реакция раствора соответствует  $pH = 7$ , кислая  $pH < 7$ , а щелочная  $pH > 7$  ( $pH$  от 7 до 14). Число  $pH$  можно определить двумя методами: колориметрическим и электрометрическим.

Колориметрический метод основан на свойствах некоторых органических красителей изменять свой цвет в зависимости от концентрации водородных ионов. Этот метод применяют главным образом в лабораторной практике.

Потенциометрический метод основан на измерении разности электрических потенциалов двух специальных электродов, помещенных в испытуемый раствор, причем один электрод — сравнительный — в процессе измерений имеет постоянный потенциал. При электрическом соединении измерительного и сравнительного электродов образуется гальванический элемент, по величине ЭДС которого можно судить о величине  $pH$  раствора.

Поскольку абсолютную величину электродного потенциала практически определить нельзя, измеряют его

относительное значение, для этого составляют гальванический элемент из измерительного (индикаторного) электрода, анализируемой среды и вспомогательного электрода. В отличие от индикаторного электрода, потенциал которого функционально связан с активностью контролируемых ионов, потенциал вспомогательного электрода должен оставаться постоянным.

При соединении внешней цепью индикаторного и вспомогательного электродов, погруженных в контролируемый раствор, образуется гальванический элемент, именуемый в дальнейшем *измерительным элементом для потенциометрических измерений*.

Схема его приведена на рис. 7.9. В практике измерений обычно используют стеклянный (измерительный) и каломельный сравнительный электроды.

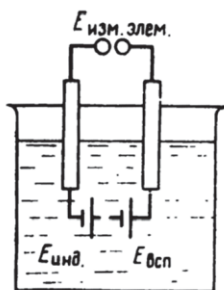


Рис. 7.9. Измерительная ячейка pH-метра

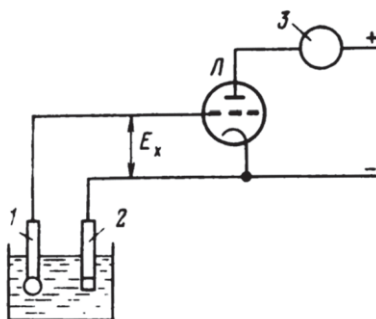


Рис. 7.10. Принципиальная схема pH-метра

Современные pH-метры представляют собой в основном автоматические приборы с непосредственным отсчетом, шкалы которых отградуированы в единицах pH. Простейшая принципиальная схема такого pH-метра показана на рис. 7.10. ЭДС измерительной ячейки (электроды 1 и 2)  $E_x$  подается на вход электронного усилителя и управляет силой тока в анодной цепи лампы Л, которая измеряется



амперметром 3. Шкала прибора отградуирована в единицах pH. Входным сопротивлением в этом случае является сопротивление участка сетка — катод лампы, которое определяется величиной сеточного тока. В качестве входного каскада применяют специальные электрометрические лампы.



*Рис. 7.11. pH-метр  
HANNA HI 99161  
для пищевой  
промышленности*

Портативные микропроцессорные pH-метры HANNA выполнены в пыле- и водонепроницаемом корпусе (IP 67), снабжены большим экраном, на котором одновременно отображаются значения pH и температуры, а также системой BEPS, предотвращающей получение ошибочных результатов из-за разряда батарей. Управление pH-метрами HANNA осуществляется при помощи всего двух клавиш. Все pH-метры серии HI 991000 поставляются с pH-электродами, выполненными по технологии «4 в 1». Это комбинированные pH-электроды со встроенным термодатчиком и усилителем. Приборы также

имеют расширенный диапазон измерения pH и температуры, режим самодиагностики, индикатор стабильности показаний и функции автоматической термокомпенсации и калибровки по буферным растворам различных стандартов. В pH-метре HI 99161 (foodpacket) применен уникальный датчик из материала Купар, позволяющий производить измерения непосредственно в продуктах питания и сырье для их производства.

*Технические характеристики прибора:*

- pH-диапазон: от  $-2,00$  до  $+16,00$  pH;
- погрешность:  $\pm 0,02$  pH;
- температура: от  $-5,0$  до  $+105,0$  °C;
- материал корпуса электрода: FC202D Купар.

## § 7.4. Измерение плотности жидкостей

Плотность является одним из параметров, характеризующих качество получаемой продукции. *Плотностью* называется отношение массы тела к его объему:

$$\rho = m / V,$$

где  $m$  и  $V$  — соответственно масса и объем тела.

Единицей плотности в Международной системе единиц (СИ) является  $\text{кг/м}^3$ . Плотность жидкостей зависит от температуры. Эта зависимость приближенно выражается формулой

$$\rho_t = \rho_{t'} [1 - \beta (t - t')],$$

где  $\rho_t$  — плотность жидкости при рабочей температуре;

$\rho_{t'}$  — плотность жидкости при некоторой температуре, отличной от рабочей;

$\beta$  — средний коэффициент объемного теплового расширения жидкости в интервале температур от  $t'$  до  $t$ .

Принято указывать плотность жидкостей при нормальной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ). Эту плотность подсчитывают по формуле

$$\rho_{20} = \rho_t [1 - \beta (20 - t)]. \quad (7.12)$$

Наибольшее применение из плотномеров для измерения плотности жидкостей получили *поплавковые, массовые, гидростатические и радиоизотопные*.

**Поплавковые плотномеры.** Работа поплавковых плотномеров основана на законе Архимеда. Поплавковые плотномеры подразделяют на приборы с плавающим и погруженным в жидкость поплавком.

На рис. 7.12 показана принципиальная схема плотномера с плавающим поплавком. Плотномер состоит из основного сосуда 1, в котором плавает металлический поплавок 2. Жидкость по входной трубе 6 поступает в переливной сосуд постоянного напора 5 и далее по трубе 7 — в основной сосуд тоже с переливным устройством. Избыточная жидкость стекает по отводящей трубе 9. На выходном конце подводящей трубы 7 имеются отражательные пластины (на рисунке не показаны), предохраняющие поплавок от завихрений в потоке жидкости. Скорость потока устанавливают при помощи диафрагмы на трубе 7, а также взаимным смещением по вертикали сосудов 1 и 5.

Изменение плотности жидкости вызывает перемещение поплавка и связанного с ним сердечника 3 (в первичных катушках 4 индукционного моста 11).

Таким образом, различной плотности измеряемой жидкости соответствует разная глубина погружения поплавка, а следовательно, и положение сердечника в индукционных катушках электрического преобразователя, которое приводит к изменению сигнала, передаваемого на вторичный прибор.

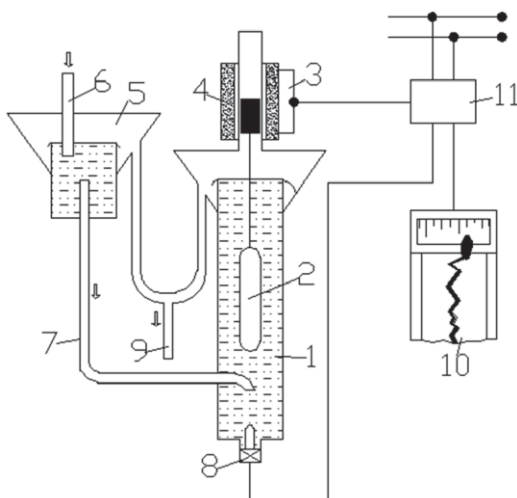


Рис. 7.12. Плотномер с плавающим поплавком

Вторичный прибор 10 (показывающий или регистрирующий) градуируется в единицах плотности. Температурная компенсация осуществляется термометром сопротивления 5, включенным в мостовую схему. Погрешность плотномеров с плавающим поплавком составляет порядка  $\pm 1\%$ .



*Рис. 7.13. Поплавковый  
плотномер DenDi*

Поплавковый плотномер DenDi выгодно отличается от обычных стеклянных ареометров или плотномеров с U-образной трубкой своей практичностью и универсальной конструкцией.

Прибор очень удобен в применении и позволяет оперативно определять плотность вязких жидкостей, не требуя предварительного их подогрева. Простота и доступность плотномера DenDi избавляют от необходимости в специальном обучении обслуживающего персонала.

Калибровка поплавкового плотномера DenDi осуществляется по дистиллированной воде самим пользователем, а уход за прибором значительно облегчается

благодаря съемному стеклянному поплавку.

Цифровая технология регистрации показаний плотности минимизирует риск человеческой ошибки, нередко возникающей при работе со стеклянными ареометрами и записи данных вручную.

Устройство после нажатия двух кнопок на внешней панели выводит реальную плотность жидкости, а электроника плотномера автоматически высчитывает ее приведенные величины для температуры 15; 20 °C (возможны и другие значения по заказу).

Отображение данных происходит на жидкокристаллическом дисплее поплавкового плотномера DenDi. При необходимости данные могут быть переданы через встроенный ИК-порт на автономный принтер или на ПК для занесения в базу данных и осуществления оперативного качественного и количественного контроля.

Все это делает плотномер DenDi доступным и очень удобным в использовании при любых погодных условиях, что значительно упрощает работу для пользователя.

**Массовые плотномеры.** Действие массовых плотномеров основано на том, что масса жидкости при неизменном ее объеме прямо пропорциональна плотности.

Массовые плотномеры используют обычно для измерения плотности суспензий и жидкостей, содержащих твердые включения. На рис. 7.14 приведена одна из схем

массового плотномера с пневматическим преобразователем, в котором используется принцип уравнивания.

Исследуемая жидкость поступает в прибор по трубе 1 и выходит по трубе 2. Входная и выходная трубы через гибкие резиновые патрубки или металлические сильфоны 3 соединены с петлеобразной трубой 4 из нержавеющей стали. Для чистки петли предусмотрено съемное колено 5.

Петлеобразная труба укреплена в вилке, которая может свободно поворачиваться на оси скобы 6. Петля тягой 7 соединена с рычагом 10, который поворачивается на оси 11. На правом плече рычага помещены противовес 12, уравнивающий систему, когда петля заполнена водой, и тяга 15, связанная с сильфоном обратной связи 16 пневматического преобразователя.

В пневматический преобразователь по трубке 17 непрерывно поступает под давлением 140 кПа сжатый воздух, который, пройдя через дроссель, выходит через зазор между соплом 13 и заслонкой 14. Одновременно воздух заполняет полость сильфона обратной связи и трубку 18, идущую к манометру.

Рычаг находится в равновесии, когда по петле протекает жидкость плотностью  $1 \text{ г/см}^3$ . При плотности, превышающей  $1 \text{ г/см}^3$ , вес петли увеличивается, рычаг 10 поворачивается против часовой стрелки, зазор между соплом и заслонкой уменьшается, давление воздуха в преобразователе увеличивается, сильфон растягивается и, воздействуя на тягу 15, опускает правый конец рычага до тех пор, пока не восстановится его равновесное положение.

Ход рычага ограничен упорами 9. Пределы измерения регулируются при помощи дополнительных грузов, навешиваемых на надрезы 8. Давление воздуха в сильфоне, изменяющееся пропорционально изменению плотности жидкости, измеряется вторичным прибором, шкала которого

проградуирована в единицах плотности. Прибор измеряет плотность жидкости при фактической ее температуре.

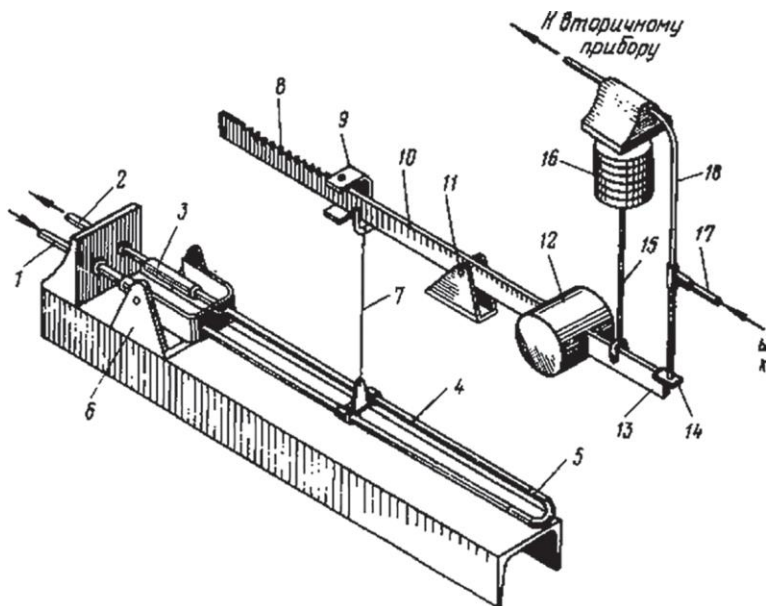


Рис. 7.14. Массовый плотномер

**Гидростатические плотномеры.** Принцип действия гидростатических плотномеров основан на том, что давление  $P$  в жидкости на некоторой глубине  $H$  от поверхности равно весу столба жидкости высотой  $H$ , т. е.

$$P = H \times g \times \rho, \quad (7.13)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;

$g$  — ускорение свободного падения.

Из формулы (7.13) следует, что давление столба жидкости постоянной высоты  $H$  является мерой плотности жидкости.

Давление столба жидкости может быть непосредственно измерено, например, мембранным манометром, если его чувствительный элемент поместить в нижнюю часть сосуда

(с постоянным уровнем), через который протекает исследуемая жидкость. Чтобы исключить влияние колебаний уровня жидкости на точность намерений, применяют дифференциальный метод, в соответствии с которым измеряют разность давлений двух столбов жидкости разной высоты.

На основании выражения (7.13) можно записать

$$P_1 - P_2 = \rho g (H_1 - H_2), \quad (7.14)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — давления столбов жидкости;

$H_1$  и  $H_2$  — соответственно высота столбов жидкости, или

$$\Delta P = \rho g / H. \quad (7.15)$$

Отсюда следует, что перепад давления жидкости в двух горизонтальных слоях, расстояние между которыми  $H$  остается постоянным, является мерой плотности жидкости.

На рис. 7.15 показана схема гидростатического плотномера типа ДМП. Контролируемая жидкость непрерывно протекает через сосуд 1, уровень в котором постоянен.

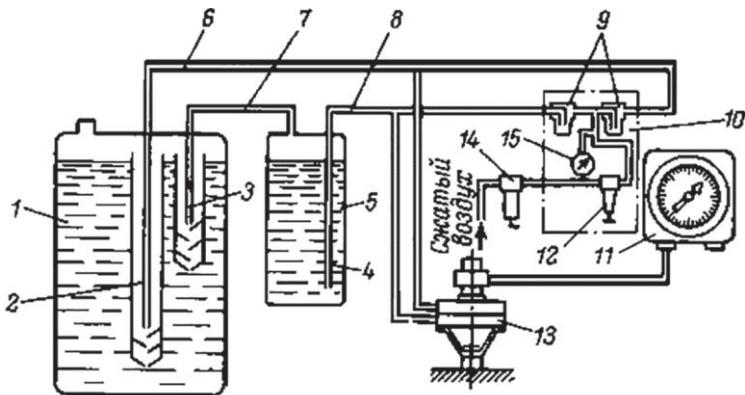


Рис. 7.15. Гидростатический плотномер типа ДМП

Сосуд 5 заполнен сравнительной жидкостью с известной плотностью до постоянного уровня. Сжатый воздух через фильтр 14 и редуктор 12 блока 10, состоящего из

контрольных стаканчиков 9 и манометра 75, подается в трубки.

По линии 6 воздух поступает в трубку 2 и, проходя через жидкость, уходит далее в атмосферу. По линии 8 воздух сначала поступает в трубку 4, проходит через жидкость сосуда 5, а затем поступает в трубки 7 и 3. Перепад давлений, образующийся в трубках, измеряется дифманометром 13 с пневматическим преобразователем. Пневматический сигнал направляется на вторичный прибор 11.

Разновидностью гидростатических плотномеров являются пружинные преобразователи плотности, в которых изменение плотности измеряемой среды вызывает деформацию упругих элементов, помещенных в контролируемую жидкость.

На рис. 7.16 показана принципиальная схема сильфонного преобразователя плотности типа ПЖС-П. Внутри измерительной камеры на некотором расстоянии один от другого помещены сильфоны 11 и 14, соединенные между собой коромыслом 13. При изменении плотности жидкости внутри измерительной камеры изменяется деформация сильфонов, и коромысло поворачивается относительно своей точки опоры. Коромысло 13 угловым рычагом 9 соединено с Т-образным рычагом 1 унифицированного пневмопреобразователя. Герметичность вывода рычага 9 обеспечивается мембраной 10. Конструкция вывода предусматривает возможность поворота рычага 9.

Внутренние полости сильфонов 11 и 14, а также сильфона 12, предназначенного для компенсации погрешности, вызываемой изменением температуры измеряемой жидкости, последовательно соединены трубкой с вентилем. Сильфоны заполнены контролируемой жидкостью, плотность которой минимальна. Плотномер ПЖС-П позволяет измерять плотность в интервале 500–2 500 кг/м<sup>3</sup>.



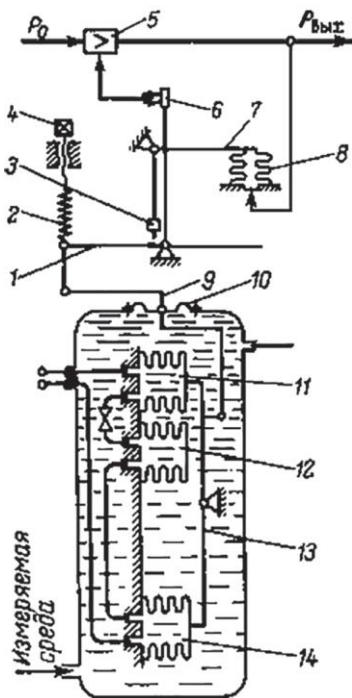


Рис. 7.16. Сильфонный преобразователь плотности:  
 1, 7, 9 — рычаги; 2 — пружина;  
 3 — наездник;  
 4 — устройство для регулировки нуля;  
 5 — усилитель;  
 6 — элемент сопло-заслонка;  
 5, 11, 12, 14 — сильфоны;  
 10 — мембрана; 13 — коромысло

**Радиоизотопные плотномеры.** Изменение плотности радиоизотопными приборами основано на определении изменения интенсивности пучка  $\gamma$ -лучей после прохождения их через измеряемую среду.

На рис. 7.17 показана принципиальная блок-схема радиоизотопного плотномера жидкости (типа ПЖР-2).

В технологическом трубопроводе установлены источник радиоактивного излучения 1 (Со60, С137) и приемник излучения 3;  $\gamma$ -лучи от источника 1 проходят через стенки сосуда 2 и слой жидкости, а затем попадают в приемник излучения 3. Электрический сигнал приемника, являющийся функцией измеряемой плотности, формируется блоком 4 и передается на вход электронного усилителя-преобразователя 5, куда поступает также сигнал от дополнительного устройства.

Дополнительное устройство включает в себя радиоизотопный источник излучения 9, металлический клин 10, приемник излучения 11 и формирующий блок 12. Источник и приемник излучения дополнительного устройства такие же, как в первичном преобразователе.

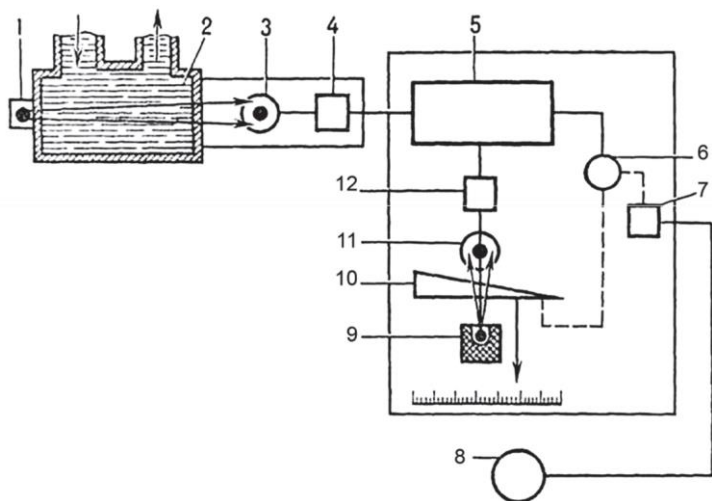


Рис. 7.17. Блок-схема радиоизотопного плотномера

Разность сигналов усиливается в усилителе-преобразователе и подается на реверсивный двигатель 6, который связан с металлическим клином 10 и сердечником дифференциально-трансформаторного преобразователя 7 вторичного прибора 8.

В зависимости от величины и знака сигнала в усилителе-преобразователе реверсивный двигатель перемещает металлический клин до тех пор, пока разность сигналов не станет равной нулю. Величина перемещения клина пропорциональна изменению плотности жидкости. Интервал измеряемой плотности 600–2 000 кг/м<sup>3</sup>; погрешность прибора  $\pm 2\%$ .



Рис. 7.18. Плотномер  
«Плот-3М»

Плотномер «Плот-3» АУТП.414122.006 ТУ предназначен для автоматического измерения плотности жидкости с максимальной кинематической вязкостью до  $200 \text{ мм}^2/\text{с}$  ( $200 \text{ сСт}$ ) в диапазоне температур от минус  $40$  до  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  и передаче измеренных значений по запросу извне в контроллер измерительной системы или в персональный компьютер по интерфейсу «токовая петля» (RS-232, RS-485 с использованием адаптеров АД-1, АД-2).

Плотномер типа «Плот-3» применяют в составе автоматизированных систем учета чистых однородных жидкостей на потоках продуктопроводах, где требуется периодическое дистанционное измерение плотности, температуры и кинематической вязкости жидкости, в том числе на магистральных нефтепроводах и на установках по переработке товарной нефти. Вид взрывозащиты — «взрывонепроницаемая оболочка» и «искробезопасная электрическая цепь» (IExibdIIIBT5 в комплекте с искрозащитным барьером «Бастион»).

#### *Технические характеристики*

Принцип работы — вибрационный: частота колебаний чувствительного элемента, погруженного в жидкость, функционально связана с плотностью жидкости, а добротность колебательной системы — с кинематической вязкостью.

В качестве термометра используется встроенный стандартный платиновый преобразователь сопротивления.

Обработку информации проводит микроконтроллер семейства MCS-51 типа AT89C52.

Предел допускаемой основной относительной погрешности при измерении плотности составляет  $\pm(0,035; 0,05; 0,1) \%$ .

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры  $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения кинематической вязкости  $\pm(0,4 + 0,04 \cdot \nu) \text{ мм}^2/\text{с}$ , где  $\nu$  — значение кинематической вязкости,  $\text{мм}^2/\text{с}$ .

Рабочая среда прибора — чистые однородные жидкости с максимальной кинематической вязкостью  $200 \text{ мм}^2/\text{с}$  ( $200 \text{ сСт}$ ): товарная нефть и продукты ее переработки, спирты, сжиженный углеводородный газ (СУГ), растворители и другие жидкости, неагрессивные по отношению к сплавам 45НХТ, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т.

Диапазон измеряемых плотностей: от  $420$  до  $1600 \text{ кг/м}^3$ .

Диапазон измеряемых температур: от  $-40$  до  $+85$  °С.

Диапазон измеряемых вязкостей: от  $1,5$  до  $200$  мм<sup>2</sup>/с (сСт).

«Плот-3» питается от источника постоянного тока, установленного вне взрывоопасной зоны через искрозащитный барьер «Бастиян» (АУТП.468243.001 ТУ). При напряжении на входе плотномера от  $6,5$  до  $15$  В ток потребления не более  $20$  мА.

«Плот-3» принимает управляющие команды и выдает измеренные плотности, температуры и вязкости жидкости по каналу последовательного обмена типа «токовая петля» в виде импульсов тока с уровнем логической «1» от  $5$  до  $20$  мА и логического «0» от  $0$  до  $0,1$  мА со скоростью передачи  $2400$  бит/с.

Прибор обладает минимальными габаритными размерами и массой, четырехпроводной линией связи до  $2000$  м длиной, малым энергопотреблением, импортной элементной базой. Межповерочный интервал прибора составляет  $2$  года.

## § 7.5. Измерение влажности газов и твердых материалов

Содержание влаги в любом теле характеризуется его абсолютной или относительной влажностью. Под *абсолютной влажностью газа* понимают массу водяного пара в  $1,0$  м<sup>3</sup> газовой смеси при нормальных условиях. Абсолютная влажность измеряется в г/м<sup>3</sup> (сух.) и г/м<sup>3</sup> (вл.).

Под *относительной влажностью  $\phi$  газа* понимают отношение массы (объема) водяного пара, заключающегося в  $1,0$  м<sup>3</sup> смеси, к максимально возможной массе (объему) водяного пара в  $1,0$  м<sup>3</sup> при той же температуре. Относительная влажность — величина безразмерная, иногда ее выражают в процентах.

Под *влажностью твердых тел  $W$*  понимают отношение массы влаги, содержащейся в теле, к массе влажного материала. Отношение же массы влаги в теле к массе абсолютно сухого материала называют *влажностью содержания*.

К наиболее известным и применяемым методам измерения влажности газов относятся:

1. *Психрометрический метод*, основанный на психрометрическом эффекте, т. е. на зависимости скорости испарения влаги в окружающую среду от влажности этой среды.
2. *Метод точки росы*, заключающийся в определении температуры, до которой необходимо охладить (при неизменном давлении) насыщенный газ для того, чтобы довести его до состояния насыщения.
3. *Сорбционный метод*, основанный на поглощении влаги из анализируемой среды каким-либо гигроскопичным веществом.
4. *Кондуктометрический метод*, основанный на зависимости электрических свойств материалов от влагосодержания.
5. *Спектрометрический метод*, который использует зависимость поглощения излучений от влажности исследуемого газа.
6. *Электрохимический метод* (метод К. Фишера), основанный на измерении электрического потенциала, возникающего в специальном растворе (растворе Фишера).
7. *Метод теплопроводности*, основанный на различии теплопроводностей сухого и влажного газа.

Наибольшее применение получили первые три метода.

Основой метода является взаимная связь между нормальным давлением (упругостью) водяного пара и разностью показаний сухого термометра  $t_c$  и термометра, поверхность которого смачивается водой  $t_m$  (мокрый термометр). Разность между показаниями сухого и мокрого термометров называется *психрометрической разностью*.

Относительная влажность в зависимости от психрометрической разности  $t_c - t_m$  выражается зависимостью

$$\varphi = [P_B - A(t_c - t_m)] / P_c, \quad (7.16)$$

где  $P_v$  — упругость паров, насыщающих испытываемую среду при температуре  $t_m$  влажного термометра;

$P_c$  — упругость паров, насыщающих испытываемую среду при температуре сухого термометра;

$A$  — психрометрический коэффициент, зависящий от конструкции психрометра, скорости обдувания влажного термометра газом и давления газа; определяется по справочным психрометрическим таблицам, составленным для определенных конструкций психрометров.

На рис. 7.19 показана принципиальная схема электрического психрометра с термометрами сопротивления. Измерительная часть прибора состоит из двух мостов, *I* и *II*. Оба моста питаются переменным током от обмотки силового трансформатора электронного усилителя и имеют оба общих плеча,  $R_1$  и  $R_2$ . Сухой термометр сопротивления  $R_{mc}$  включен в плечо моста *I*, мокрый  $R_{m.m.}$  — в плечо моста *II*. Мост *I* образован постоянными резисторами  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_{m.m.}$

Напряжение между точками *a* и *b* моста *I* пропорционально температуре сухого термометра сопротивления, а напряжение между точками *a* и *c* — температуре мокрого термометра сопротивления.

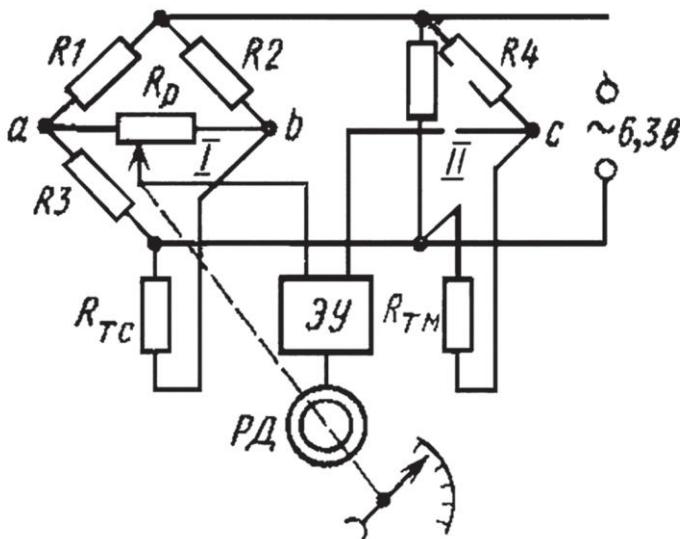


Рис. 7.19. Принципиальная схема электрического психрометра

Величина напряжения между точками  $b$  и  $c$  пропорциональна разности температур сухого и мокрого термометров. Равновесие измерительной схемы устанавливается автоматически изменением положения движка  $R_p$ , приводимого в движение двигателем  $РД$ . Шкала прибора отградуирована в единицах измерения относительной влажности (%). Класс точности 3,0.

**Метод точки росы.** При автоматическом контроле влажности газа этим методом точка росы определяется по ослаблению светового потока, отраженного от зеркала и воспринимаемого фотозлементом. Влагомеры, работающие на основе метода точки росы, называют также *гигрометрами*.

На рис. 7.20 показана принципиальная схема конденсационного гигрометра точки росы. Охладителем является полупроводниковая термоэлектрическая батарея  $ПТ$ , работающая на принципе эффекта Пельтье: при прохождении

тока в термоэлектрической цепи температура одного спая повышается, другого спая понижается. К холодному спаю полупроводникового термоэлемента припаяно металлическое зеркало 3. Сила тока, проходящего через термоэлемент, регулируется переменным сопротивлением 4. Для измерения температуры металлического зеркала к его поверхности припаян полупроводниковый термоэлектропреобразователь  $T$ , подключенный к милливольтметру со шкалой, градуированной в единицах абсолютной влажности.

Работает гигрометр следующим образом. В отсутствие на поверхности зеркала конденсата падающий на него от осветителя  $I$  световой поток отражается и попадает на фотоэлемент 5. В цепи фотоэлемента течет фототок, поэтому к сетке одной электронной лампы подается отрицательное, а к другой — положительное напряжение. Уменьшение силы анодного тока в цепи одной из ламп и увеличение ее в цепи другой приводит к тому, что якорь поляризованного реле занимает положение  $I$ . При этом через термоэлемент  $ПТ$  проходит ток, и зеркало охлаждается.

Появление конденсата на поверхности зеркала приводит к рассеянию светового потока, а следовательно, и к уменьшению освещенности фотоэлемента. Это вызывает переключение контактов поляризованного реле в положение  $II$ , при котором питание термоэлемента отключается. Так как окружающая температура выше температуры зеркала, конденсат с поверхности зеркала быстро испаряется; реле вновь включает в работу термоэлемент.

Для подогрева зеркала предусмотрено питание термоэлемента током обратного направления от батареи  $B$  при помощи ручного переключателя  $П$ . Поверхность зеркала обдувается вентилятором 2.



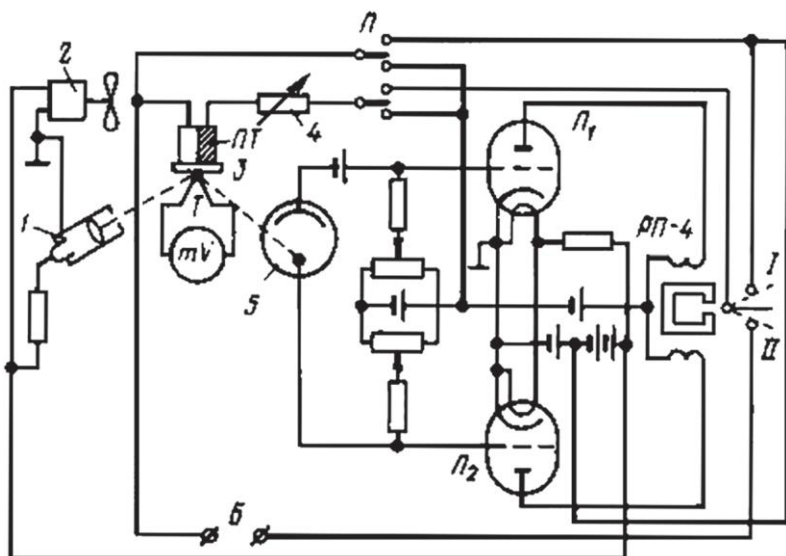


Рис. 7.20. Принципиальная схема конденсационного гигрометра

**Сорбционно-кулонометрический метод.** Данный метод является абсолютным и не требует градуировки прибора по эталонным газовым смесям. Сорбционно-кулонометрические влагомеры применяют для измерения микроконцентрации влаги в газах. Принципиальная схема кулонометрического влагомера приведена на рис. 7.21. Во внутреннем канале цилиндрического пластмассового корпуса 1 размещены два электрода 2, выполненные в виде спиралей. Между электродами нанесена пленка 3 частично гидратированного пятиоксида фосфора, обладающего очень высокой способностью сорбировать влагу. Через чувствительный элемент в направлении, указанном стрелками, проходит контролируемый газовый поток со строго постоянным расходом. Геометрические размеры чувствительного элемента и расход контролируемого газа подбирают таким образом, чтобы влага практически полностью извлекалась из газа. Обычно длина канала чувствительного элемента

составляет несколько десятков сантиметров, диаметр 0,5–2 мм; диаметр электродов не более 0,2 мм.

Поглощенная влага, соединяясь с веществом пленки, образует раствор фосфорной кислоты с высокой удельной электрической проводимостью.

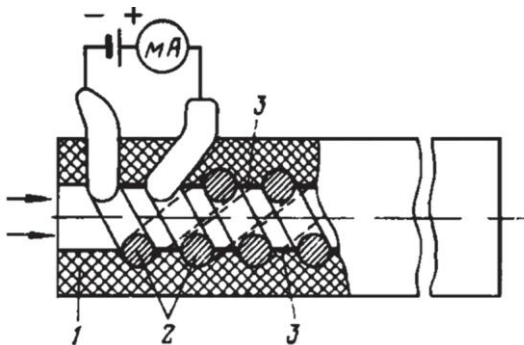


Рис. 7.21. Принципиальная схема кулонометрического влагомера

К электродам подключен источник постоянного напряжения, которое должно превышать потенциал разложения воды; поэтому одновременно с разложением влаги происходит ее электролиз. Получающиеся в процессе электролиза кислород и водород уносятся потоком контролируемого газа. В установившемся режиме количество поглощенной и разложенной в единицу времени воды одинаково и, следовательно, в соответствии с законом Фарадея сила тока, измеряемая микроамперметром, включенным последовательно с источником питания, является мерой концентрации влаги в анализируемом газе.

**Кондуктометрический метод.** Сухие твердые материалы обычно являются диэлектриками, а влажные капиллярно-пористые тела становятся проводниками. Для капиллярно-пористых материалов зависимость электрического сопротивления от влажности  $W$  выражается соотношением

$$R = A / W^n, \quad (7.17)$$

где  $A$  — постоянная величина, зависящая от свойств контролируемого материала;

$n$  — показатель степени, также зависящий от свойств материала.

Из уравнения (7.17) следует, что зависимость  $R$  от  $W$  нелинейна. При изменении относительной влажности от 2 до 30 % сопротивление изменяется очень значительно.

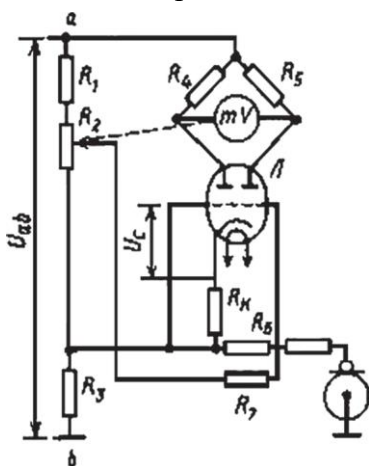


Рис. 7.22. Схема кондуктометрического влагомера

Поэтому зависимость  $R$  от  $W$  используется как способ определения влажности обычно до 30 %. Приборы, основанные на этой зависимости, получили название *кондуктометрических*, а сам метод назван *кондуктометрическим*.

Чувствительными элементами кондуктометрических влагомеров (рис. 7.22) являются два электрода, выполненные обычно в виде пластин, трубок, роликов и т. д. Измерительным устройством служат электрические мосты.

## § 7.6. Измерение вязкости жидкости

*Вязкость* — это свойство жидкостей и газов, характеризующее их сопротивляемость скольжению или сдвигу. При сдвиге двух слоев жидкости при установившемся течении возникает тангенциальная сила, которая согласно закону Ньютона определяется соотношением

$$F = \mu S (dv / dn), \quad (7.18)$$

где  $F$  — сила сдвига;

$\mu$  — размерный коэффициент, называемый динамической вязкостью или просто вязкостью;

$S$  — площадь внутреннего трения (площадь сдвига);

$v$  — скорость течения слоя;

$n$  — толщина движущегося слоя;

$dv / dn$  — градиент скорости движения по толщине движущегося слоя (скорость сдвига).

Если  $\mu$  не зависит от  $dv / dn$ , то жидкости называют *ньютоновскими*, все остальные жидкости относятся к группе *неньютоновских*.

За единицу динамической вязкости в международной системе единиц принята вязкость потока жидкости, в которой линейная скорость под воздействием давления сдвига в 1 Па имеет градиент 1 м/с на 1 м расстояния, перпендикулярного по отношению к плоскости сдвига. Эта единица динамической вязкости имеет размерность Па·с (паскаль-секунда).

Кинематическая вязкость в Международной системе единиц имеет размерность м<sup>2</sup>/с. Связь между динамической и кинетической вязкостью определяется соотношением

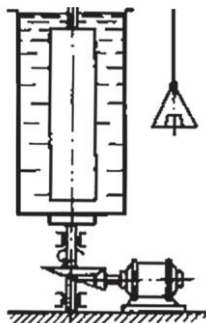
$$\nu = \mu / \rho, \quad (7.19)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости.

Вязкость жидкости в значительной мере зависит от ее температуры: чем выше температура жидкости, тем меньше ее вязкость, и наоборот. Для измерения вязкости жидкостей применяют вискозиметры, основанные на следующих методах: истечения, падающего тела, крутящего момента и вибрации.

Принципиальная схема вискозиметра с коаксиальными цилиндрами показана на рис. 7.23. В этом приборе внешний цилиндр, наполненный исследуемой жидкостью, приводится в равномерное вращение. Внутренний цилиндр удерживают неподвижным, накладывая гири на весовую

платформу. Величина вращающего момента определяется произведением веса уравнивающих гирь на радиус шкива, на котором закреплена нить, поддерживающая весовую платформу.



*Рис. 7.23. Вискозиметр с коаксиальными цилиндрами*

Для непрерывного измерения вязкости жидкости в технологическом потоке применяют вискозиметры с параллельными дисками (рис. 7.24).

Внутри измерительной камеры установлены неподвижные диски, между которыми с постоянной скоростью вращаются подвижные диски. Последние соединены жестко с валом двигателя. Статор двигателя закреплен в опорном подшипнике и поворачивается в сторону, противоположную направлению вращения дисков. Момент вращения, развиваемый статором двигателя, уравнивается грузом, подвешенным на тросе. Плечом груза служит профилированный диск. Плечо увеличивается с увеличением угла поворота статора.

Находясь в жидкости, диски притормаживаются и поворачивают статор двигателя до тех пор, пока развиваемый ими момент не уравнивается моментом, развиваемым грузом. Каждому значению вязкости измеряемой жидкости соответствует вполне определенный угол поворота статора двигателя.

Со статором двигателя жестко связан подвижный контакт реохорда. Сопротивление реохорда является плечом уравновешенного моста, шкала которого градуирована в единицах вязкости. Для стабилизации температуры контролируемой жидкости измерительная камера помещена в термостат, заполненный маслом. Класс точности прибора 1,0.

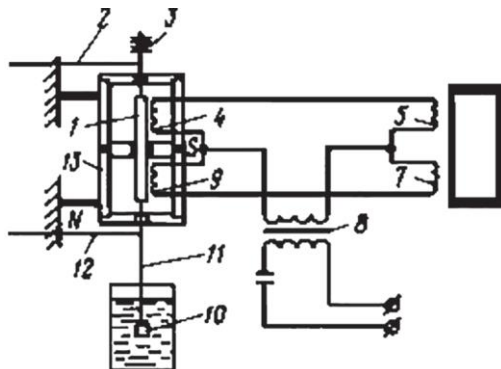


Рис. 7.24. Вискозиметр с параллельными дисками

**Вибрационные вискозиметры.** Измерение вязкости вибрационными вискозиметрами основано на зависимости амплитуды колебаний тела в контролируемой жидкости от ее вязкости.

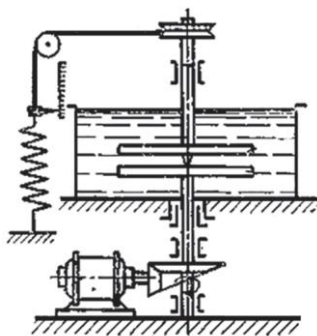


Рис. 7.25. Вибрационный вискозиметр

В зависимости от частоты колебаний вибрационные вискозиметры можно разделить на два типа: низкочастотные, работающие на частоте до 1 кГц, и ультразвуковые, работающие на частоте 10–1 000 кГц.

Принципиальная схема низкочастотного вискозиметра показана на рис. 7.25.

К сердечнику *I*, закрепленному на двух пружинах 2 и 12, на стержне *II* прикреплены насадка 10 и сменные шайбы 3. Сердечник помещен в поле постоянного магнита 13 и двух одинаковых катушек 4 и 9, соединенных последовательно. При прохождении через катушки переменного тока создается переменное магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем постоянного магнита, вызывает вибрацию сердечника *I* с насадкой 10. Амплитуда колебаний при прочих равных условиях зависит от вязкости жидкости. Чем больше вязкость, тем меньше амплитуда колебаний, и наоборот.

Амплитуда колебаний преобразуется в пропорциональное напряжение, которое измеряется милливольтметром 6 со шкалой, проградуированной в единицах вязкости. Катушки 4 и 9 питаются через стабилизатор напряжения и обмотки 5 и 7 дифференциального трансформатора 8.

**Ультразвуковые вискозиметры.** Действие ультразвуковых вискозиметров основано на использовании прямого и обратного магнитострикционного или пьезоэлектрического эффектов. Наибольшее распространение из ультразвуковых вискозиметров получили приборы с магнитострикционными преобразователями, работающими в импульсном режиме.

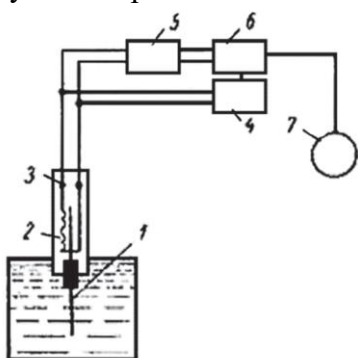


Рис. 7.26. Ультразвуковой (высокочастотный) вискозиметр

На рис. 7.26 показана принципиальная схема одного из ультразвуковых (высокочастотных) вискозиметров. Пластина закреплена в торце гильзы 3. Нижняя половина пластины помещена в измеряемую жидкость. В гильзе находится катушка возбуждения 2, питаемая от генератора 4. На катушку подается импульс тока длительно-стью около 20 мкс, в результате

этого в пластине возникают продольные колебания с затухающей амплитудой. Затухание колебаний пластины происходит тем быстрее, чем больше вязкость жидкости.

Импульс, возбуждающий катушку, одновременно усиливается усилителем 5 и детектируется в детекторе 6 с триггером. Через триггер запирается генератор 4. Вследствие обратного магнитострикционного эффекта частота колебаний напряжения в катушке равна частоте колебаний пластины

$$U = U_m \exp(-\lambda \tau) \sin(\omega \tau), \quad (7.20)$$

где  $U$  — напряжение на концах катушки;

$U_m$  — начальная амплитуда напряжения;

$\lambda$  — коэффициент затухания колебаний, зависящий от вязкости жидкости;

$\omega$  — частота свободных колебаний пластины;

$\tau$  — время.

Это напряжение и обеспечивает запирание генератора импульсов до момента затухания колебаний пластины. После этого генератор импульсов снова возбуждается.

Таким образом, мерой степени затухания являются интервалы времени между последовательными возбуждениями генератора. Чем больше вязкость жидкости, тем меньше эти интервалы. Сигнал с детектора поступает на вторичный прибор 7. Шкала прибора градуирована в единицах вязкости. Погрешность вибрационных вискозиметров равна 2,5 %; в зависимости от конструкции интервал измерения 0,0001–100 Па·с.

Область применения вибрационных вискозиметров ограничивается ньютоновскими жидкостями.





Рис. 7.27. Вибрационный  
вискозиметр SV-10

Вибрационный вискозиметр SV-10 предназначен для измерения динамической вязкости различных жидких сред в реальном масштабе времени.

Области применения: химическая, нефтеперерабатывающая, пищевая, фармацевтическая, парфюмерная и другие отрасли промышленности, а также научные исследования.

Измерения вязкости проводятся с помощью метода камертонной вибрации. За основу измерений берется величина электрического тока, необходимая для

того, чтобы поддерживать постоянную амплитуду вибрации сенсорных пластин вискозиметра в жидкой среде. Подобный метод позволяет проводить измерения в режиме реального времени с отслеживанием изменений вязкости и температуры образца, что и обеспечивает широкие функциональные возможности данных приборов.

*Особенности вибрационного вискозиметра SV-10:*

- высокая точность: достигает  $1\% \times 1$  (повторяемость результатов) в полном диапазоне измерений;
- непрерывные измерения в течение длительного времени в широком диапазоне: возможны непрерывные измерения в полном диапазоне без замены сенсорных пластин;
- стандартный сенсор температуры, предназначенный для определения температуры образца и расположенный между двумя сенсорными пластинами, что позволяет точно определить взаимосвязь между температурой и вязкостью;
- на дисплее отражается значение, равное произведению динамической вязкости и плотности образца (размерность  $\text{мПа}\cdot\text{с} \times \text{г}/\text{см}^3$ ), поскольку при вибрационном методе измерения плотность образца существенно влияет на значение вязкости;
- вискозиметр можно калибровать с использованием жидкости, имеющей стандартное или заранее известное значение вязкости.

## § 7.7. Газовый анализ

Газоанализаторы разделяют на две большие группы: химические и физические. Действие *химических газоанализаторов* основано на поглощении одной или нескольких составных частей газовой смеси каким-либо веществом.

В *физических газоанализаторах* для анализа газовой смеси используется какое-либо физическое свойство газовой смеси, изменяющееся при изменении содержания определяемого компонента. В качестве такого свойства может быть выбрана любая физическая величина, характеризующая газовую смесь (плотность, теплопроводность, теплота сгорания, коэффициент преломления и т. п.). Единственное условие выбора — аддитивность свойств выбранной величины в данной газовой смеси.

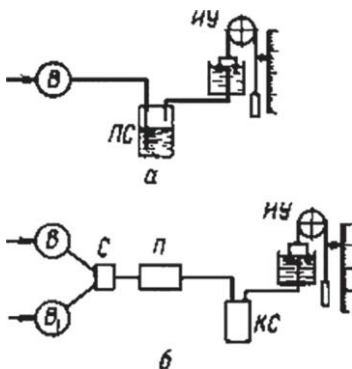


Рис. 7.28. Структурные  
схемы абсорбционных  
газоанализаторов

**Химические газоанализаторы.** Работа химических (абсорбционных) газоанализаторов основана на изменении объема газовой смеси после удаления анализируемого компонента. Удаляется анализируемый компонент абсорбцией, сжиганием или последующим поглощением.

На рис. 7.28, *а* представлена принципиальная схема газоанализатора на  $\text{CO}_2$ .

Определенный объем исследуемого газа засасывается в мерный сосуд  $B$  для первичного измерения пробы газа. Затем отмеренный объем (обычно 100 см<sup>3</sup>) пропускается через поглотительный сосуд  $ПС$ , заполненный раствором едкого калия; последний полностью поглощает СО<sub>2</sub>. Непоглощенный остаток анализируемого газа поступает

в газоизмерительное устройство *ИУ*, где измеряется уменьшение объема, соответствующее поглощенному  $\text{CO}_2$ .

На рис. 7.28, *б* изображена принципиальная схема газоанализатора на  $\text{O}_2$ . Эта схема существенно отличается от предыдущей. Кроме мерного объема *В* имеется второй объем *В1* для измерения объема водорода, подаваемого из баллона. Вместо поглотительного сосуда в этом приборе имеется электрическая печь *П*, перед которой установлен смеситель *С*. За печью находится конденсационный сосуд *КС*, в котором конденсируются образовавшиеся при сжигании водорода водяные пары. Остаток пробы газа направляется в измерительное устройство.

**Физические газоанализаторы.** Из многочисленных газоанализаторов этой группы ниже рассмотрены термокондуктометрические, термомагнитные, оптико-акустические и ультрафиолетового поглощения.

**Термокондуктометрические газоанализаторы.** Эти газоанализаторы основаны на изменении теплопроводности газовой смеси при изменении ее содержания. Теплопроводность бинарной газовой смеси в первом приближении

$$\lambda_{см} = \lambda_1 a + \lambda_2 b, \quad (7.21)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — теплопроводность компонентов, Вт/(м·К);

*a* и *b* — концентрация компонентов, %.

Принципиальная схема термокондуктометрического газоанализатора показана на рис. 7.29. В плечи измерительного неуравновешенного моста включены одинаковые сопротивления в виде нагреваемых током нитей. Две из них, включенные в противоположные плечи моста, помещены в камеры, через которые проходит исследуемый газ, а две другие — в камеры, наполненные воздухом.

Если теплопроводность измеряемой газовой смеси отличается от теплопроводности воздуха, то температуры

нитей будут различны и в диагонали  $ab$  возникнет напряжение разбаланса, пропорциональное содержанию определяемого компонента в газовой смеси. Это напряжение измеряется потенциометром, шкала которого отградуирована в процентах определяемого компонента. Для устранения влияния температуры окружающей среды на результат измерения блок измерительных ячеек термостатируют.

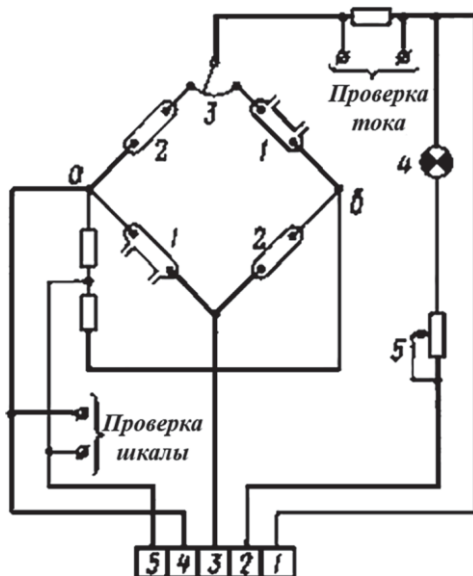


Рис. 7.29. Термокондуктометрический газоанализатор:  
1 — измерительная камера; 2 — сравнительная камера;  
3, 5 — резисторы; 4 — лампа

Термокондуктометрические газоанализаторы используют для определения содержания водорода в азотоводородной смеси в производстве синтетического аммиака; водорода в газе карбидных печей и в производстве электролитического водорода, аммиака в аммиачно-воздушной смеси производства слабой азотной кислоты, диоксида серы в печном газе производства серной кислоты.

Например, для определения содержания водорода в аммиаке в пределах 0–1 % применяют преобразователь термокондуктометрический ДТП21-УХЛ4.

Основная погрешность этих газоанализаторов составляет 2,5–10 % в зависимости от интервала измерения.

**Терромагнитные газоанализаторы.** Эти газоанализаторы основаны на зависимости парамагнитных свойств кислорода от температуры.

Кислород относится к парамагнитным газам, характеризующимся положительной магнитной восприимчивостью. С изменением температуры взаимодействие кислорода с магнитным полем существенно изменяется. Магнитная восприимчивость кислорода, под которой понимают отношение интенсивности намагничивания к напряженности магнитного поля, на два порядка выше, чем для других газов.

Промышленность выпускает терромагнитные газоанализаторы нескольких типов.

На рис. 7.30 показана принципиальная схема преобразователя одного из таких приборов. Преобразователь газоанализатора состоит из кольцевой камеры с горизонтальной стеклянной трубчатой перемычкой, помещенной между полюсами постоянного магнита так, что магнитное поле находится на одной стороне перемычки. На перемычку намотана двухсекционная нагреваемая обмотка из тонкой платиновой проволоки. Секции обмоток представляют собой два плеча неуравновешенного моста и служат измерительными элементами. Двумя другими плечами служат постоянные манганиновые сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ .

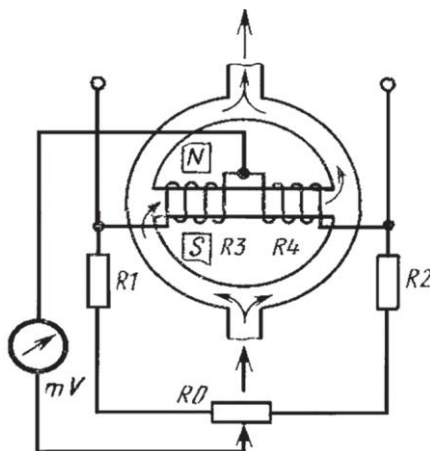


Рис. 7.30. Принципиальная схема преобразования термомагнитного газоанализатора

При наличии в газовой смеси кислорода часть потока ответвляется в перемычку, где образуется течение газа в направлении слева направо (от большей напряженности магнитного поля к меньшей).

Образующийся конвекционный поток газа переносит тепло от обмотки  $R_3$  к  $R_4$ , поэтому температура секций изменяется ( $R_3$  охлаждается,  $R_4$  нагревается) и изменяется их сопротивление.

Величина разности сопротивлений функционально связана с концентрацией кислорода в исследуемой газовой смеси.

Разбаланс моста измеряется вторичным прибором, шкала которого отградуирована в процентах кислорода. Сопротивление  $R_0$  служит для установки силы тока питания моста. Система термостатирования преобразователя обеспечивает постоянство его температуры с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

**Оптико-акустические газоанализаторы.** Приборы основаны на избирательном поглощении измеряемым компонентом инфракрасных лучей. Это явление для волн определенной длины описывается законом поглощения.

На рис. 7.31 показана типовая схема оптико-акустического газоанализатора на оксид углерода. Потоки инфракрасного излучения от излучателей 2 и 14 поочередно прерываются obtюратором 3, приводимым во вращение синхронным двигателем 1. Затем потоки проходят через рабочую 4, сравнительную 13 и фильтровые 6 кюветы и попадают в приемные цилиндры ОАП (оптико-акустический преобразователь) 12, заполненные смесью оксида углерода с азотом.

Пульсации давления, возникающие в приемнике с частотой obtюрации, в конденсаторном микрофоне 10 с мембраной 8 преобразуются усилителем 9 в выходной сигнал, который регистрируется самописцем 7. Перед измерением рабочую кювету заполняют нулевым газом (азотом), так как сравнительная кювета тоже заполнена азотом. Потоки в рабочем и сравнительном каналах будут равны, поэтому и сигнал с приемника будет равен нулю (мембрана не колеблется). Анализируемая газовая смесь очищается от механических примесей фильтром 5. При поступлении анализируемой газовой смеси, содержащей оксид углерода, в рабочую кювету поток в рабочем канале ослабляется и возникает сигнал с ОАП (мембрана колеблется).

Фильтровальные кюветы 6 заполняются сопутствующими измеряемому компоненту газами в анализируемой среде. Необходимость этого вызвана тем, что такие газы, как, например, диоксид углерода, имеют полосу поглощения, которая перекрывает частично полосу поглощения оксида углерода. При заполнении фильтровой камеры диоксидом углерода соответствующей концентрации та часть излучения, которая ослабляется оксидом, а поглощается диоксидом углерода, в рабочую кювету не попадает. Поэтому дополнительная погрешность из-за наличия в анализируемой среде диоксида углерода будет минимальной.

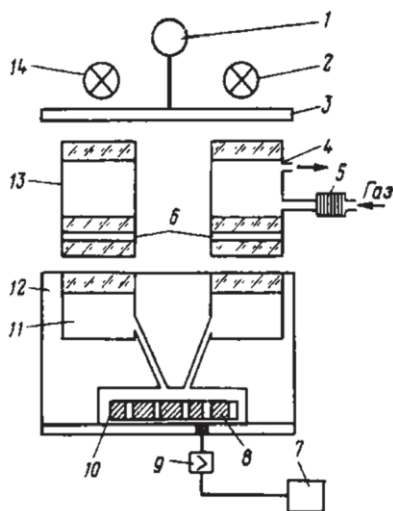


Рис. 7.31. Типовая схема оптико-акустического газоанализатора

В нашей стране выпускаются оптико-акустические газоанализаторы более 10 типов: ОА, ГОА, ГАИ, ГИП, «Сигма», «Кедр» на оксид и диоксид углерода, метан, ацетилен в сложных газовых смесях. Диапазон измерения концентрации этих газов от 0,001 до 100 %. Классы точности приборов от 10 до 2.

**Газоанализаторы ультрафиолетового поглощения.** Эти приборы в основном применяют для анализа паров ртути в воздухе, измерения концентрации хлора, сероводорода, диоксида азота и некоторых других веществ.

В качестве источников ультрафиолетового излучения используют ртутные лампы. Для преобразования интенсивности ультрафиолетового излучения в электрический сигнал применяют фотоэлементы и фоторезисторы. На рис. 7.32 показана схема работающего по принципу оптической компенсации газоанализатора на хлор с одним фотоэлементом.

Для выделения необходимого участка ультрафиолетовой части спектра на пути потоков установлены светофильтры. Потоки излучения прерываются обтюратором с частотой 50 Гц.

Модулированные в противофазе потоки излучения поступают в измерительную и сравнительную кюветы. При появлении в измерительной кювете хлора равенство потоков излучения нарушается; в цепи фотоэлемента появляется



пульсирующий фототок частотой 50 Гц, который усиливается фазочувствительным усилителем, на выходе которого подключен реверсивный двигатель, кинематический связанный с компенсирующим оптическим клином.

Для корректировки нуля газоанализатора служит заслонка. Интервалы измерения 0–0,3 и 0–2 %. Основная погрешность  $\pm 5$  % максимального значения шкалы.

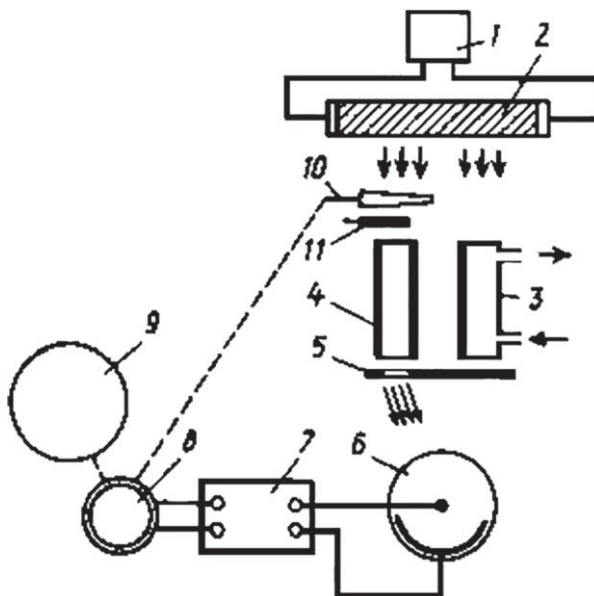


Рис. 7.32. Схема ультрафиолетового газоанализатора:

- 1 — генератор высокой частоты;
- 2 — ртутно-кварцевая лампа;
- 3 — измерительная кювета; 4 — сравнительная кювета;
- 5 — обтюратор; 6 — фотозлемент;
- 7 — электронный фазочувствительный усилитель;
- 8 — реверсивный двигатель; 9 — вторичный прибор;
- 10 — компенсационная заслонка;
- 11 — заслонка регулировки нуля



Газоанализатор CHEMIST 401 — переносной газоанализатор с ЖК-дисплеем, измерительными ячейками для  $O_2$  и  $CO$ , без возможности увеличения количества ячеек, имеющий 99 ячеек памяти, встроенный принтер, встроенный аккумулятор, русифицированное меню.

Рис. 7.33. Газоанализатор CHEMIST 401

*Комплектация газоанализатора:*

- газозаборный зонд 300 мм,
- фильтр пылевлагозащиты,
- зарядное устройство,
- трубка для замера давления,
- зонд для измерения температуры воздуха,
- катушечная бумажная лента для принтера,
- пластиковый кейс.

*Измеряемые параметры:*  $O_2$ ,  $CO$ , температура дымовых газов, температура воздуха, давление в газоходе.

*Вычисляемые параметры:*  $CO_2$ , коэффициент избытка воздуха, потери в газоходе, КПД.

*Дополнительные возможности:* газозаборный зонд 750 мм (до 1100 °С), комплект для замера сажи, замер дифференциального давления.

**Хроматография.** Газовая хроматография — основной метод анализа сложных газовых смесей.

В соответствии с ГОСТ 17567–81 *хроматография* — область науки, изучающая процессы, основанные на перемещении зоны вещества вдоль слоя сорбента в потоке подвижной фазы и связанные с многократным повторением сорбционных и десорбционных актов. В зависимости от факторов, определяющих разделение анализируемой газовой смеси на отдельные компоненты, газовую хроматографию подразделяют на проявительную с программированием температуры и изотермическую; с программированием расхода газа-носителя; хроматермографию.

Ниже рассмотрены некоторые методы газовой хроматографии.

При *проявительной газохроматографии* в верхнюю часть колонки, заполненную твердым адсорбентом, вводится небольшое количество анализируемой смеси (пробы). После введения пробы через хроматографическую колонку с небольшой скоростью пропускается газ-носитель, не адсорбирующийся твердым сорбентом или адсорбирующийся слабее любого из компонентов анализируемой смеси.

По мере прохождения газа-носителя взятая для разделения проба постепенно продвигается через адсорбент в хроматографической колонке. Компоненты смеси при этом отделяются один от другого и при полном разделении выходят из колонки в определенной последовательности. При полном разделении между компонентами находятся зоны чистого газа-носителя. В качестве газа-носителя применяют очищенный от пыли и масла воздух, диоксид углерода, азот, гелий, водород и др. В качестве адсорбентов (неподвижная фаза) используют активный уголь, силикагель, оксид алюминия, активный боксит, оксид магния, молекулярные сита и т. д.

При газожидкостной хроматографии подвижной фазой является газ-носитель, в поток которого вводится исследуемая проба (газ или пар). Неподвижная фаза — жидкость (адсорбент), адсорбирующая компоненты анализируемой смеси — распределяется тонкой пленкой на поверхности твердого носителя. Она должна быть практически нелетучей, выбор ее зависит от состава анализируемой смеси.

В качестве твердого носителя используют материалы, инертные к компонентам подвижной и неподвижной фаз и обеспечивающие достаточную поверхность фазового контакта.

Газовая хроматография с программированием расхода газоносителя отличается от проявительной тем, что расход

газа носителя изменяется в течение процесса по заданному закону.

Схема хроматографического разделения показана на рис. 7.34.

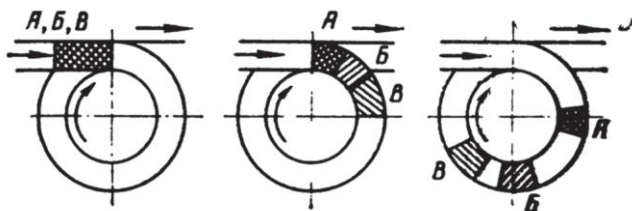


Рис. 7.34. Схема хроматографического разделения:  
A, B, B — компоненты пробы газа

Проба газа, состоящая из трех компонентов A, B и B, перемещается газом-носителем через слой сорбента, помещенного в хроматографическую колонку. Так как компоненты сорбируются или растворяются неодинаково, скорость движения их по колонке будет различной. Через некоторое время это приведет к полному разделению смеси: первым будет компонент B как наименее сорбирующийся, вторым B и затем A. В результате из хроматографической колонки будут выходить или газ-носитель, или бинарная смесь (газ-носитель + компонент), что фиксируется детектором, сигнал которого пропорционален концентрации компонента в смеси.

В хроматермографии температура колонки изменяется в течение процесса по заданному закону по длине колонки и во времени. Следовательно, осуществляется одновременное действие перемещающегося температурного поля и потока газ-носителя.

Если наряду с подвижной фазой (газ-носитель) движется неравномерное температурное поле с градиентом в том же направлении, то имеется в виду стационарная хроматография. При этом компоненты смеси, перемещаясь вместе

с температурным полем, занимают определенные места, соответствующие так называемым характеристическим температурам. Это дает возможность проводить автоматически качественный и количественный анализ.

При нестационарной хроматографии температурное поле уменьшается в направлении, обратном направлению движения газа-носителя.

В газовой хроматографии с программированием температуры температура колонки изменяется в течение процесса по заданному закону по ее длине и во времени.

В соответствии с ГОСТ 17567-81 *газовый хроматограф* — прибор, предназначенный для качественного и количественного анализа смесей веществ, выделения из смесей чистых компонентов или узких фракций, а также для физико-химических измерений. Газовые хроматографы подразделяются на *лабораторные* и *промышленные*.

В состав хроматографа (рис. 7.35) наряду с основными элементами (хроматографическая колонка, детектор) входит ряд вспомогательных устройств, обеспечивающих требуемые условия работы (ввод анализируемой смеси в хроматограф, измерение и обработку выходного сигнала хроматографа и др.).

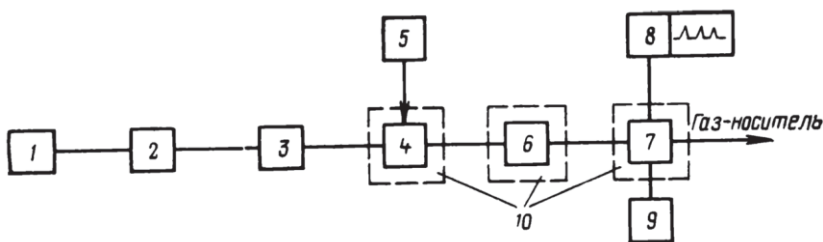


Рис. 7.35. Блок-схема газового хроматографа:

- 1 — баллон с газом-носителем; 2 — регулятор расхода газа-носителя;  
3 — измеритель расхода газа-носителя; 4 — испаритель; 5 — дозатор;  
6 — хроматографическая колонка; 7 — детектор;  
8 — регистрирующий измерительный прибор; 9 — интегратор;  
10 — термостаты

Подвижная фаза (газ-носитель) подается в колонку, как правило, из баллона, где находится под давлением. Газ-носитель должен удовлетворять требованиям: быть инертным по отношению к анализируемым веществам, неподвижной фазе и конструктивным материалам, с которыми он контактирует; содержать минимальное количество примесей; не ухудшать работу детектора.

В большинстве случаев от расхода газа-носителя зависит чувствительность детектора, т. е. изменение расхода газа-носителя вызывает изменение высоты и площади пика. Поэтому в хроматографах применяют регулятор расхода, сочетающий в себе стабилизатор и измеритель расхода газа-носителя. Расход газа-носителя в хроматографах составляет, как правило, от 15 до 200 см<sup>3</sup>/мин. Доза исследуемого вещества вводится дозатором в хроматограф быстро в виде «пробки». Газы обычно вводят герметичными газовыми шприцами или крановыми дозаторами. Объемы газовой дозы составляют от 0,1 до 10 см<sup>3</sup>. Жидкость вводят микрошприцами. В хроматографическом анализе объемы доз жидкостей обычно от 0,5 до 10 мкл. В хроматографах обычно используют краны-дозаторы и шприцы.

Иглу шприца с исследуемой дозой вводят через самоуплотняющуюся резиновую прокладку непосредственно в хроматографическую колонку. При этом начальная часть колонки не заполняется неподвижной фазой. Устройство, в котором герметично закреплены начальный участок колонки и самоуплотняющаяся резиновая прокладка, называют *испарителем*. Для поддержания требуемой температуры, при которой испаряется доза жидкой исследуемой смеси, и нагрева до необходимой температуры начального участка испаритель снабжен термостатом. Рабочие температуры испарителей в современных хроматографах составляют 500 °С и более.

Хроматографическая колонка представляет собой трубку из стекла, полимерного материала или металла, чаще

всего из коррозионно-стойкой стали. Колонки бывают прямые, U-образные и спиральные. Спиральные колонки наиболее компактны, поэтому их применяют чаще, чем колонки других типов. В современных хроматографах используют насадочные колонки с внутренним диаметром от 1 до 6 мм и длиной от нескольких десятков сантиметров до 6 м (средняя длина 1–2 м). Капиллярная колонка представляет собой трубку с внутренним диаметром 0,2–0,5 мм и длиной от 25 до 200 м (средняя длина 50 м). Размеры колонки существенно влияют на ее эффективность.

Хроматографические колонки устанавливают в специальном термостате. В термостаты современных хроматографов можно устанавливать две и более колонок длиной по 3–6 м. Интервал рабочих температур термостата колонок может быть от  $-100$  до  $+500$  °C, точность поддержания требуемой температуры составляет  $\pm 0,2$  °C.

Термостат колонок как наиболее крупный блок хроматографа определяет конструктивные особенности хроматографа. Этот блок является основным в хроматографе, поскольку в нем размещены хроматографические колонки, а на его плоскостях — детекторы, дозаторы и испарители.

Для расшифровки бинарной смеси на выходе из колонки используется детектор.

Газохроматографический детектор — преобразовательный элемент системы газохроматографического детектирования, в котором осуществляется преобразование изменения состава проходящей через него газообразной смеси в изменение выходного сигнала. Известно более пятидесяти методов детектирования в хроматографии и соответственно столько же детекторов, но лишь несколько из них широко применяют в хроматографах. Это, в первую очередь, детектор по теплопроводности, пламенно-ионизационный, термоионный, электронно-захватный и пламенно-фотометрический детекторы.



*Рис. 7.36. Хроматографы газовые промышленные моделей 700, 700XA, 771*

Хроматографы предназначены для непрерывного измерения содержания компонентов в различных газовых смесях и жидких углеводородах, в том числе для измерения объемной доли компонентов природного (попутного) газа.

Хроматографы состоят из трех основных частей, объединенных конструктивно: блока контроллера, блока кондиционирования (подготовки) пробы, одного или нескольких аналитических блоков, а также системы пробоотбора.

Аналитический блок (верхний корпус) включает в себя детекторы, хроматографические колонки, предусилитель, клапаны переключения потока и электромагнитные клапаны. Хроматограф может комплектоваться детектором теплопроводности (ДТП), пламенно-ионизационным детектором (ПИД), которые устанавливаются в аналитическом блоке, или пламенно-фотометрическим детектором (ПФД), который выполнен в собственной взрывонепроницаемой оболочке и устанавливается рядом с хроматографом и соединяется с ним электрическими цепями и газовыми трубопроводами.

Блок кондиционирования (подготовки) пробы включает в себя регуляторы и реле давления, измеритель потока пробы, фильтры, манометры.

Блок контроллера (нижний корпус) включает в себя электронику и порты для обработки сигналов, контроля за прибором, хранения данных и их передачу.

Корпуса блоков, выполненные из алюминиевого сплава с содержанием магния менее 6 %, соединены в единую конструкцию, которая может монтироваться на стене, стойке или на полу. Блок кондиционирования (подготовки) пробы монтируется на входе в аналитический блок на нижней части станины блока. Электрические соединения между блоками осуществляются проводами, проходящими через металлические патрубки между блоками. Внутренняя полость патрубков с проложенными проводами заливается компаундом.



На боковых поверхностях корпуса блока кондиционирования (подготовки) пробы установлены фитинги с огнепреградителями для подключения трубопроводов с калибровочными и контролируемыми газами. На корпусе аналитического блока установлены таблички с маркировкой взрывозащиты и предупредительной надписью. В нижней части блока контроллера выполнены резьбовые отверстия для кабельных вводов.

Клапан впрыска жидких проб LSIV проходит сквозь стенку корпуса хроматографа и фиксируется стопорным кольцом. На клапане имеются два отверстия: одно для ввода пробы, а другое — для выпуска в поток пробного газа. Внутри клапана расположены пневматический поршень, испарительная камера, в конце которой имеется отверстие для выпуска испаренной пробы в систему термостата.

*Детекторы по теплопроводности* очень чувствительны к изменению температуры, поэтому их помещают в термостаты для обеспечения стабильности нулевой линии. Основной частью детектора этого вида является термочувствительный элемент, материалом которого служит вольфрамовая или платиновая проволока, или полупроводниковый резистор.

Электрическая схема детектора по теплопроводности показана на рис. 7.37. Измерительный элемент  $D_1$  и сравнительный элемент  $D_2$  с резисторами  $R_1$  и  $R_2$  образуют мостовую схему, в диагональ которой включен источник тока  $E$ . Резисторы нагреваются до постоянной температуры. При прохождении через ячейку  $D_1$  определяемого компонента температура ее сопротивления изменяется вследствие различия теплопроводностей компонентов анализируемой газовой смеси. Изменение температуры вызывает изменение сопротивления этой ячейки. Сопротивление ячейки  $D_2$  остается без изменения, так как через нее пропускается все время только газ-носитель. При новом значении сопротивления ячейки  $D_1$  между точками  $A$  и  $B$  мостовой измерительной схемы возникнет разность потенциалов, которая измеряется автоматическим

потенциометром  $\Pi$ . Записывающее устройство потенциометра вычерчивает хроматограмму.

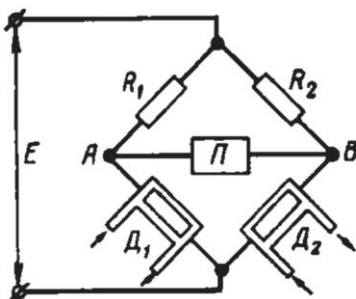


Рис. 7.37. Электрическая схема детектора теплопроводности

*Хроматограмма* — представление сигнала газохроматографического детектора как функции времени. Нулевая линия хроматограммы — участок хроматограммы, представляющий собой запись сигнала дифференциального детектора во время выхода из хроматографической колонки чистого газа-носителя.

Кратковременное отклонение пера вторичного прибора от нулевой линии, вызванное различными помехами, называется *шумами*, непрерывное и длительное отклонение нулевой линии в одном направлении — *дрейфом нуля*.

Хроматограмма, изображенная на рис. 7.48, называется дифференциальной и состоит из хроматографических пиков 1 и 2.

*Хроматографический пик* — графическое изображение зависимости величины, пропорциональной мгновенному количеству определяемого вещества, от времени в потоке подвижной фазы на выходе колонки или в другой точке, где производится измерение.

Основание пика  $AB$  (см. рис. 7.38) получают интерполяцией основной линии между крайними точками пика. Площадь, заключенную между пиком и его основанием, называют *площадью под пиком*, а расстояние  $h$  от вершины пика

до основания, измеренное параллельно оси ординат и представляющее собой сигнал детектора, — *высотой пика*. Отрезок основания  $\mu$ , заключенный между касательными к точкам перегиба к каждой стороне пика, называется *шириной пика*. Линия  $CD$ , параллельная основанию пика и делящая высоту пика пополам, называется *полушириной пика*.

Пространство от места введения пробы до детектора, заполненное чистым газом-носителем, называется *мертвым объемом разделительной колонки*.

*Объем твердого тела* есть объем, занимаемый твердым носителем или активным твердым телом в колонке, а *объем жидкости* — объем, занимаемый жидкой фазой в колонке. *Свободным объемом* называется объем колонки, не занимаемый ни жидкой фазой, ни твердым носителем.

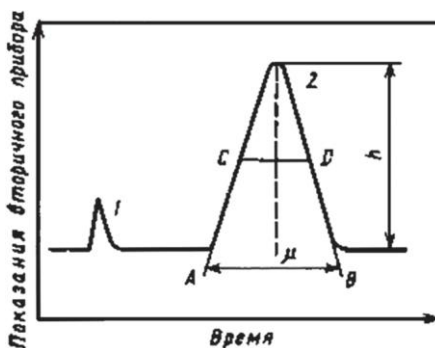


Рис. 7.38. Дифференциальная хроматограмма

*Время газохроматографического удерживания* — интервал времени от момента ввода пробы в газохроматографическую колонку до момента выхода из нее определяемого вещества максимальной концентрации.

Сложность и трудоемкость ручной обработки хроматограмм, низкая точность результатов расчета, особенно в случае асимметричных или плохо разделенных пиков, существенно затрудняет практическое использование хроматографов при анализе сложных многокомпонентных

смесей. Это определило использование в хроматографии специальных средств вычислительной техники для автоматизации процесса обработки хроматограмм — интеграторов и специальных вычислительных устройств на базе микроЭВМ (специализированные микроЭВМ).

**Масс-спектрометрия.** Преимущество масс-спектрометрического метода — быстрый и полный анализ многокомпонентных газовых смесей. При этом для анализа требуются ничтожно малые количества вещества.

В условиях глубокого вакуума молекулы или атомы анализируемого вещества ионизируются с образованием положительно заряженных ионов. Ионы, получившие ускорение в электрическом поле, разделяются по своим массам в магнитном поле. Сумма электрических зарядов движущихся ионов образует ионный ток. Измерение ионного тока, создаваемого частицами той или иной массы, позволяет судить о концентрации частиц в общем составе анализируемого вещества. В масс-спектрометре любой конструкции основной частью является масс-анализатор, в котором происходят ионизация, формирование ионного луча, разделение его на составляющие ионные лучи, соответствующие строго определенным массам, и последовательное раздельное собирание ионных лучей на коллекторе.

Соответственно этому масс-анализатор любого масс-спектрометра состоит из источника ионов, собственно анализатора и приемника ионов. Магнитные поля, при помощи которых ионы разделяются по массам, различны. Наиболее часто применяют поля, развернутые под углом  $180^\circ$  к потоку электронов, и секторные — под углом  $90$  и  $60^\circ$ .

Принципиальная схема масс-спектрометра для анализа газа, иллюстрирующая разделение ионов при помощи однородного  $180$ -градусного магнитного поля, показана на рис. 7.39.

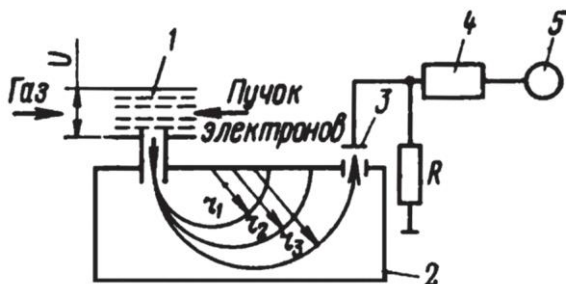


Рис. 7.39. Принципиальная схема масс-спектрометра

В ионизационную камеру 1, в которой создан глубокий вакуум, системой пуска вводится анализируемая газовая смесь. Молекулы газа бомбардируются пучком электронов (от раскаленного катода). Получающиеся в результате бомбардировки положительные ионы, обладающие одинаковым положительным зарядом  $e$ , но различной массой  $m$  (для различных компонентов), имеют очень незначительную начальную энергию. Под действием электрического поля, обусловленного приложенной к стенкам ионизационной камеры разности потенциалов  $V$ , ионы получают ускорение и вылетают с определенной скоростью через щель ионизационной камеры. Далее ионы попадают в камеру 2 анализатора, где действует однородное магнитное поле с вектором напряженности  $H$ , направленным перпендикулярно плоскости чертежа. В зависимости от величины  $H$ , скорости входа ионов, т. е. от величины  $V$ , а также от величин  $m$  и  $e$  различные ионы описывают траектории различных радиусов  $r_1, r_2, r_3$  и т. д. При постоянных  $V, H$  и  $e$  в выходную щель камеры 2 и далее на коллектор 3 попадают только ионы с определенным значением  $m$ . Попадая на заземленный через сопротивление  $R$  коллектор, ионы отдают ему свои заряды. Ионный ток создает на сопротивлении  $R$  падение напряжения, которое усиливается усилителем постоянного тока 4 и передается на измерительный прибор 5.

# **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

## **Основные требования техники безопасности**

Техника безопасности работ включает в себя следующие требования:

- включение аппаратуры на стенде производится только под контролем преподавателя или вспомогательного персонала кафедры;
- все соединения электрических схем должны быть тщательно изолированы;
- не допускается сборка и разборка схемы, находящейся под напряжением;
- не разрешается оставлять приборы под напряжением без надзора;
- проверка наличия напряжения может производиться только соответствующими приборами;
- после окончания работ на стенде вся аппаратура выключается и приводится в состояние, соответствующее первоначальному.

## **Лабораторная работа № 1.**

### **Исследование характеристик пирометрического милливольтметра**

#### **1.1. Цель и содержание работы**

##### **1.1.1. Цель работы.**

В процессе выполнения этой работы студент должен ознакомиться с устройством магнитоэлектрических пирометрических милливольтметров, научиться правильно ими пользоваться и оценивать их погрешность.

##### **1.1.2. Содержание работы:**

- 1) изучить устройство и принцип действия пирометрического милливольтметра по представленным в лаборатории плакатам и пособиям;

- 2) определить технические характеристики приборов;
- 3) определить основную погрешность и вариацию;
- 4) сравнить полученные величины погрешностей испытуемого милливольтметра с допустимыми погрешностями, приведенными в инструкции завода-изготовителя, и дать заключение о пригодности прибора;
- 5) определить дополнительную погрешность, вызываемую отклонением сопротивления внешней цепи от величины, на которую градуирован прибор;
- 6) построить график зависимости ЭДС от температуры (по теоретическим и экспериментальным данным);
- 7) составить отчет по работе.

## 1.2. Краткие теоретические сведения

Пирометрические милливольтметры являются электроизмерительными приборами магнитоэлектрической системы. Они предназначены для измерения температуры в комплекте с термопарами, телескопом радиационного пирометра, а также для работы в комплекте автоматического электрического газоанализатора.

Измерительная система пирометрического милливольтметра состоит из постоянного магнита (1) с полюсными наконечниками (2). Неподвижного стального сердечника (5), подвижной рамки (3), спиральных пружин (6), указывающей системы (4) (стрелка, шкала) и добавочного сопротивления (рис. Л 1.1).

Чаще всего рамка крепится на кернах, которые опираются на подпятники из агата или рубина. Указывающие милливольтметры с рамкой на кернах изготавливают как с вертикальной, так и с горизонтальной осью вращения. В регистрирующих приборах рамка подвешена на тонких металлических лентах (растяжках), которые, как

и спиральные пружины, служат для создания противодействующего момента и для подвода тока к рамкам.

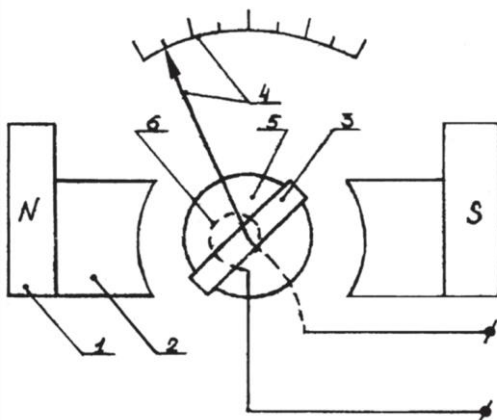


Рис. Л 1.1. Измерительная система пирометрического милливольтметра

Принцип действия прибора основан на уравнивании электромагнитного вращающего момента рамки (пропорционален току) противодействующим моментом пружины (пропорционален углу закручивания):

$$M_1 = K_1 B I;$$

$$M_2 = K_2 E \varphi;$$

$$\varphi = \frac{K_1 B}{K_2 E} \cdot I = C I,$$

где  $B$  — магнитная индукция;

$E$  — модуль продольной упругости;

$K_1, K_2, C$  — постоянные коэффициенты.

Изменение  $B$  и  $E$  практически не влияет на показания приборов, т. к. с изменением температуры эти параметры меняются почти одинаково. Шкала милливольтметра равномерна и чувствительность его постоянна в любом месте шкалы.



Сила тока в цепи:

$$I = \frac{E(t; t_0)}{R} = \frac{E(t; t_0)}{R_p + R_\partial + R_{\text{вн}}},$$

где  $E(t; t_0) = E(t) - E(t_0)$  — разность термо-ЭДС, возникающих в горячем и холодном спае термопары;

$R$  — общее сопротивление цепи;

$R_p, R_\partial, R_{\text{вн}}$  — (сопротивление рамки, добавочное, внешней цепи);

$t, t_0$  — температура горячего и холодного спаев термопары.

Градуировку шкалы пирометрического милливольтметра в градусах температуры производят применительно к определенной градуировке термопары и для заданного значения сопротивления внешней цепи  $R_{\text{вн}}$ , которое указывается на шкале прибора и может быть равно 0,6; 5; 15; 25 Ом.

Внутреннее сопротивление делают достаточно большим, включая последовательно с рамкой дополнительную катушку сопротивления.

Добавочное сопротивление  $R_\partial$ , выполняемое из манганиновой проволоки, служит для подгонки диапазона шкалы и ограничения влияния изменений температуры окружающей среды на показания прибора (температурный коэффициент сопротивления манганина низкий).

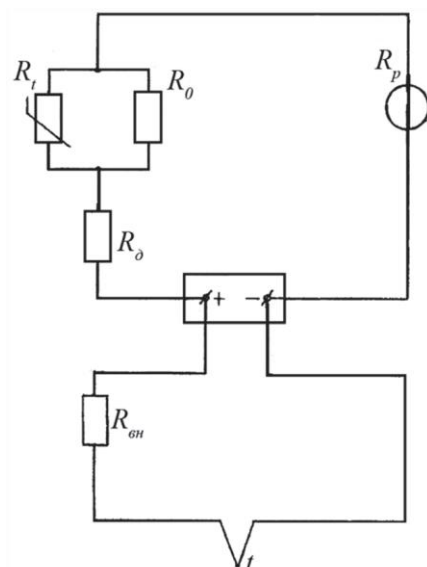


Рис. Л 1.2. Схема к лабораторной работе № 1

На измерительной схеме милливольтметра Ш-4051 (рис. Л 1.2) представлены следующие сопротивления:

$R_p$  — сопротивление рамки;

$R_d$  — добавочное сопротивление для изменения диапазона шкалы прибора;

$R_m$  — полупроводниковое сопротивление для температурной компенсации;

$R_0$  — шунтирующее сопротивление для спрямления нелинейной характеристики.

Выпускается большая номенклатура промышленных милливольтметров для измерения, записи и сигнализации температуры — разных пределов измерения, внешних видов, габаритных размеров, аналоговых и цифровых. Классы точности промышленных милливольтметров: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5.

### 1.3. Описание лабораторной установки

На лицевой панели лабораторного стенда (рис. Л 1.3, Л 1.4) представлены:

- 1 — измерительная схема прибора;
- 2 — милливольтметр;
- 3 — колодка зажимов милливольтметра;
- 4 — декада магазина сопротивления;
- 5 — переключатель режима работы милливольтметра;
- 6 — тумблер включения питания щита;
- 7 — лампы, сигнализирующие наличие напряжения питания и режима работы милливольтметра.

При переводе переключателя 5 в положение  $V$  прибор работает как вольтметр, а в положении  $mV$  — как милливольтметр.

Сопротивление внешней цепи милливольтметра составляет 15 Ом. На лабораторном стенде оно набирается из двух последовательно включенных резисторов: постоянного, 10 Ом, за стендом и переменного, от 0 до 10 Ом (на стенде — декада магазина сопротивления).

На приставке к лабораторному стенду находится образцовый прибор — потенциометр постоянного тока.

### 1.4. Порядок и методика выполнения работы

1.4.1. Определение технических характеристик милливольтметра и потенциометра и заполнение таблицы.

Тип прибора	Тип градуиров.	Внешнее сопротивление	Класс точности	Предел измерения	Цена деления
1	2	3	4	5	6

1.4.2. Определение основной погрешности и вариации милливольтметра.

Установить корректором стрелку милливольтметра на нулевую отметку при обесточенном приборе.

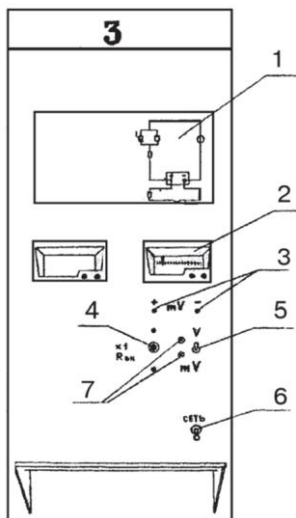


Рис. Л 1.3. Лицевая панель лабораторного стенда (1)

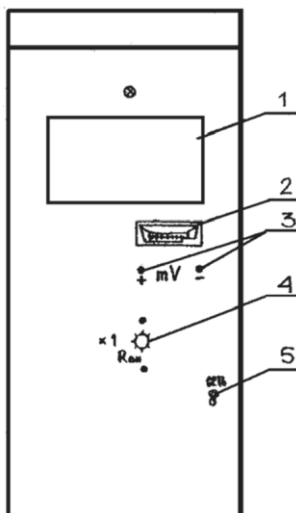


Рис. Л 1.4. Лицевая панель лабораторного стенда (2)

Собрать схему для поверки милливольтметра в соответствии с рис. Л 1.2.

На магазине сопротивлений набрать сопротивление, равное сопротивлению внешней цепи, на которое градуирован прибор.

Переключатель 5 перевести в положение  $mV$  и включить питание щита тумблером 6.

Поверка шкалы пирометрического милливольтметра производится путем сравнения его показаний с показаниями переносного потенциометра ПП.

Подготовить переносной потенциометр к работе.

Переключатель В5 прибора установить в положение «К» и реостатом «рабочий ток» установить стрелку гальванометра на «0», вначале при нажатой кнопке «грубо», затем «точно».

Перевести переключатель В5 в положение «И».

Источник регулируемого напряжения, встроенный в переносной потенциометр и имеющий два реостата для грубой и точной регулировки напряжения в пределах от  $-5$  до  $100$  мВ, служит для создания напряжения такого же порядка, как и величина ТЭДС, развиваемая промышленными термопарами.

Источником регулируемого напряжения плавно переместить стрелку от нулевой до конечной отметки шкалы и обратно. После проверки плавности хода стрелки приступить к определению основной погрешности и вариации прибора.

Проверка производится по всем оцифрованным отметкам прибора, сначала при возрастающем, а затем при убывающем значении напряжения. Величина напряжения измеряется потенциометром.

При этом стрелка гальванометра устанавливается на «0» вращением рукояток секционного переключателя и реохорда вначале при нажатой кнопке «грубо», а затем — «точно».

Результаты измерений заносят в таблицу.

Проверяемые отметки шкалы прибора	ТЭДС по градуировочной таблице	Напряжение, измеряемое потенцио- метром		Погрешности			Вариации	
				абсолютная		приведенная	абсолютная	приведенная
		Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход			
$^{\circ}\text{C}$	$E_0, \text{ мВ}$	$E_1, \text{ мВ}$	$E_2, \text{ мВ}$	$\Delta_1, \text{ мВ}$	$\Delta_2, \text{ мВ}$	$\Delta\%$	$\text{мВ}$	$\%$

1.4.3. По полученным результатам построение графиков зависимостей  $E_0(t; t_0) = f(t)$  и  $E_1 = f(t)$  или  $E_2 = f(t)$  на одних и тех же осях координат.

1.4.4. Анализ возможности переградуировки шкалы прибора на следующие пределы измерения:  $0 \div 400$   $^{\circ}\text{C}$ ;  $0 \div 200$   $^{\circ}\text{C}$ ;  $200 \div 800$   $^{\circ}\text{C}$ . Какие из предложенных вариантов можно реализовать практически? Организовать постановку опыта.

1.4.5. Анализ возможности совместной работы милливольтметра с термопарой другой градуировки. Какие из вариантов можно реализовать практически? Организовать постановку опыта.

1.4.6. Определение дополнительных погрешностей при изменении сопротивления внешней цепи на  $\pm 20\%$  от нормального.

Результаты записать в таблицу.

$R_{вн}$ номинальн.	$E_n$ номинальн.	$R_{вн}$ испыт.	$E$ испыт.	$\Delta$ мВ	$\Delta\%$ приведен.	Примечание

1.4.5. Формирование заключения о пригодности прибора к эксплуатации.

## 1.5. Составление отчета по следующей форме:

- 1) краткое описание работы (цель, содержание, характеристики приборов);
- 2) одна из схем (принципиальная, измерительная);
- 3) таблицы поверки;
- 4) графики;
- 5) заключение о пригодности прибора.

## 1.6. Контрольные вопросы

1. Почему при измерении термо-ЭДС пирометрическими милливольтметрами необходимо подгонять сопротивление внешней цепи?
2. Каково значение спиральных пружин?
3. Что такое класс точности прибора?
4. Какие способы крепления подвижных рамок милливольтметра вам известны?
5. Опишите конструкцию милливольтметра.
6. Опишите конструкцию чувствительного элемента.
7. Любую ли термопару можно подключить к данному милливольтметру?

## **Лабораторная работа № 2.**

### **Исследование характеристик автоматического потенциометра**

#### **2.1. Цель и содержание работы**

##### **2.1.1. Цель работы.**

Целью работы является освоение техники теплотехнических измерений и закрепление знаний по разделу «Потенциометры».

##### **2.1.2. Содержание работы.**

Студент должен:

- 1) ознакомиться со схемой и работой лабораторной установки и ее элементов;
- 2) научиться пользоваться потенциометром типа ПП;
- 3) изучить принцип действия поверяемого электронного потенциометра в комплекте с термопарой (отдельных узлов и их функциональной связи);
- 4) произвести поверку автоматического потенциометра и сделать заключение о пригодности прибора.

#### **2.2. Краткие теоретические сведения**

##### **2.2.1. Термопары.**

В основу измерения температуры с помощью термопар положен термоэлектрический эффект, заключающийся в том, что в замкнутой цепи, состоящей из двух или более разнородных проводников, возникает электрический ток, если хотя бы два места соединения (спая) проводников имеют различную температуру.

Цепь, состоящая из двух разнородных проводников, называется термопарой. Спай, имеющий температуру  $t$ , называется горячим, или рабочим, а спай, имеющий постоянную температуру  $t_0$  — холодным, или свободным (рис. Л 2.1).

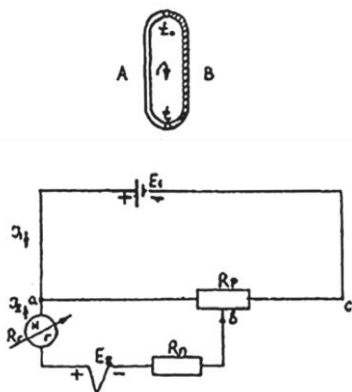


Рис. Л 2.1. Схема к лабораторной работе № 2 (1)

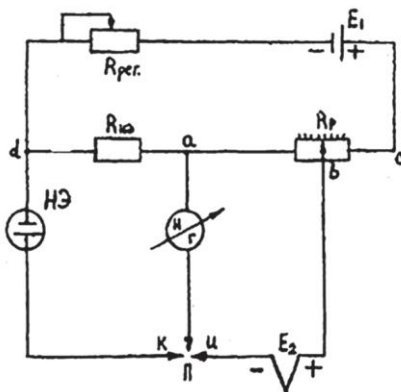


Рис. Л 2.2. Схема к лабораторной работе № 2 (2)

Проводники называются *термоэлектронами*.

Термо-ЭДС термопары  $E_{AB}(t; t_0) = f(t)$  при условии  $t_0 = const$ .

Термопара градуируется при определенной постоянной температуре холодного спая (обычно при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , реже при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ).

При измерениях температура холодного спая может быть иной, не равной температуре градуировки. В этом случае необходимо вносить поправку.

Любая пара разнородных проводников может образовывать термопару, однако не всякая термопара будет пригодна для практического применения, так как современная техника предъявляет к материалам термоэлектронных определенных требования:

- 1) устойчивость к воздействию температур;
- 2) постоянство термо-ЭДС во времени;
- 3) возможно большая величина термо-ЭДС и однозначная зависимость от температуры;
- 4) небольшой температурный коэффициент электрического сопротивления и большая электропроводимость;



- 5) воспроизводимость термоэлектрических свойств, обеспечивающая взаимозаменяемость термопар.

По ГОСТ на технические термопары с металлическими термоэлектродами можно выделить пять основных типов термопар:

- ТПП — платинородий-платиновая термопара,
- ТПР — платинородий-платинородиевая термопара,
- ТХА — хромель-алюмелевая термопара,
- ТНС — термопара из сплава НК-СА,
- ТХК — хромель-копелевая термопара.

Стандартные термопары ТХА, ТНС, ТХК изготавливаются из проволоки диаметром 0,7–3,2 мм и изолируются керамическими бусами.

Термопары ТПП и ТПР изготавливаются обычно в виде проволоки диаметром 0,5 и 1 мм, которая изолируется бусами или фарфоровыми трубками.

### 2.2.2. Потенциометры.

В качестве вторичных приборов в комплекте с термопарами используются пирометрические милливольтметры и потенциометры.

Потенциометры делятся на переносные, лабораторные и автоматические.

В потенциометрах используется компенсационный метод измерения, состоящий в уравнивании измеряемого напряжения известной разностью потенциалов, снимаемой с калиброванного сопротивления.

Цепь потенциометра (рис. Л 2.2) состоит из двух замкнутых цепей, имеющих общее сопротивление участка реохорда.

В каждой цепи имеется свой источник ЭДС —  $E_1$  и  $E_2$ .

Реохорд  $R_p$  — строго калиброванная по сопротивлению проволока.

В цепь источника  $E_2$  (термопары) включен чувствительный нуль-гальванометр, представляющий сопротивление  $R_T$ .

В эту же цепь включено сопротивление  $R_{\Pi}$ , представляющее собой сопротивление всех подводящих проводов и переходных сопротивлений в соединениях.

Ток на участке реохорда  $I_c = I_1 + I_2$ .

Передвигая точку  $b$  по реохорду, можно найти положение движка, при котором  $I_2 = 0$  (стрелка нуль-гальванометра в нулевом положении). В этом случае числитель выражения будет равен 0.

$$E_2 - I_1 R_{ab} = 0 \text{ или } E_2 = I_1 R_{ab}.$$

Но  $I_1 R_{ab} = U_{ab}$  представляет собой падение напряжения на участке реохорда  $ab$  от источника тока  $E_1$ .

Так как величины  $E_1$  и  $R_{ac}$  постоянны и известны, а величина  $R_{ab}$  отсчитывается по шкале реохорда то, зная положение движка реохорда, соответствующее моменту компенсации, нетрудно определить значение  $E_2$ .

Обычно у лабораторных и переносных потенциометров шкала реохорда градуируется непосредственно в милливольтах.

Измеряемая потенциометром ЭДС ( $E_2$ ), при условии, что  $I_2 = 0$ , равна падению напряжения на участке реохорда  $ab$  от источника  $E_1$  и не зависит ни от сопротивления соединительных приборов, ни от переходных сопротивлений.

Это положение представляет большое преимущество компенсационного метода измерения ЭДС.

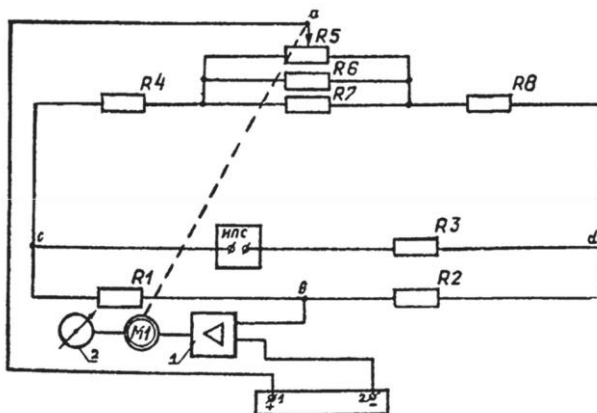


Рис. Л 2.3. Схема к лабораторной работе № 2 (3)

Так как ЭДС источника  $E_1$  в процессе его разряда уменьшается, то в потенциометре предусматривается возможность регулировки тока в цепи источника питания  $E_1$ . С этой целью в цепи источника питания  $E_1$  (рис. Л 2.3) кроме реохорда включены регулировочное сопротивление  $R_{рег}$  и сопротивление  $R_{нэ}$ , предназначенные для установки рабочего тока. Периодически для проверки рабочего тока переключатель  $P$  ставят в положение  $K$ , подключая при этом к точкам  $da$  нормальный элемент  $НЭ$  вместе с последовательно включенным нуль-гальванометром  $НГ$ .

Обычно в качестве эталона ЭДС принимают нормальный элемент Вестона, который при  $20^\circ\text{C}$  развивает ЭДС, равную 1,0185 В.

Ток в цепи источника питания регулируется сопротивлением до тех пор, пока падение напряжения на  $R_{нэ}$  не будет равным ЭДС нормального элемента. При этом стрелка нуль-гальванометра станет на нулевую отметку шкалы. После нормализации тока переключатель  $P$  ставят в положение  $И$  и измеряют ЭДС, развиваемую термопарой.

В автоматических потенциометрах компенсация осуществляется с помощью электромеханической следящей системы: в ней рассогласование между измеряемым напряжением и компенсирующей разностью потенциалов используется в качестве управляющего сигнала для исполнительного механизма (реверсивного двигателя), перемещающего движок калиброванного реохорда. В момент отсчета компенсация является полной, и о величине измеряемого напряжения судят по положению движка реохорда.

На рис. Л 2.4 дана принципиальная схема электронного автоматического потенциометра.

Измерительная схема представляет собой мост, образованный четырьмя резисторами  $R_1, R_2, R_4, R_8$  и реохордом  $R_5$  с шунтом  $R_6$  и подгоночным сопротивлением  $R_7$ .

В диагонали  $ab$  последовательно с ЭУ включен термопреобразователь  $T$ . Включение выполнено через фильтр служащий для уменьшения влияния наводок от электромагнитных полей в цепи термопары. В другую диагональ моста  $cd$  включен источник стабилизированного питания ИПС, обеспечивающий постоянство рабочего тока в измерительной схеме.

Если измеряемая ТЭДС  $E(t; t_0)$  полностью компенсируется разностью потенциалов  $U_{ав}$  на вершинах моста  $ab$ , то напряжение на входе в усилитель равно нулю:  $\Delta U = E(t; t_0) - U_{ав} = 0$ . При изменении измеряемой ТЭДС возникает напряжение разбаланса постоянного тока, которое, поступая в ЭУ, преобразуется в напряжение переменного тока и усиливается до величины, достаточной для приведения в действие реверсивного двигателя  $M_1$ . Направление вращения ротора  $РД$  зависит от знака разбаланса  $\Delta U$ , т. е. от того, в какую сторону изменяется напряжение ТЭДС.

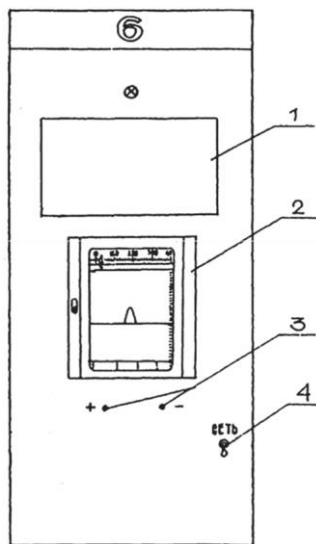


Рис. Л 2.4. Лицевая панель лабораторного стенда

РД с помощью механической передачи (шкива и троса) передвигает движок реохорда до достижения компенсации и одновременно перемещает каретку указателя с пером или печатающей головкой.

После установления равновесия в измерительной схеме напряжение разбаланса на входе в усилитель исчезает и двигатель останавливается. Таким образом, каждой измеряемой ТЭДС соответствует определенное положение движка реохорда и указателя на шкале потенциометра.

Резистор  $R_I$  изготавливается из медной проволоки и служит для автоматической компенсации температуры свободных концов термопары. С этой целью он располагается на клеммной панели прибора, в том месте, где подключаются термоэлектродные провода. Изменение, например, увеличение температуры свободных концов, вызывает одновременное снижение развиваемой термопарой ТЭДС и увеличение сопротивления  $R_I$ . При этом падение напряжения

на  $R_1$  увеличивается и происходит уменьшение  $U_{ав}$ , которое компенсирует соответствующее снижение ТЭДС.

Резистор  $R_8$  — для настройки конца шкалы. Резистор  $R_4$  предназначен для начала шкалы потенциометра, резисторы  $R_6$  и  $R_7$  — для подгонки сопротивления реохорда с учетом градуировки термопары и диапазона измерений. СД-М<sub>2</sub> служит для привода механизма передвижения диаграммы.

## 2.3. Описание лабораторной установки

На лицевой панели стенда (рис. Л 2.4) представлены автоматический потенциометр 2, измерительная схема прибора 1, колодка зажимов (клеммы) 3 прибора, тумблер 4 для включения напряжения питания. На приставке к стенду устанавливается образцовый потенциометр с встроенным в него источником регулируемого напряжения для имитации ТЭДС.

## 2.4. Порядок и методика выполнения работы

2.4.1. Определение технических характеристик приборов, представленных в лабораторной установке, и заполнение таблицы по образцу, приведенному ниже.

Тип прибора	Тип градуировки	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

2.4.2. Подготовка установки к проведению поверки.

После ознакомления с устройством и принципом действия приборов приступают к подготовке переносного потенциометра ПП-63, для чего органы управления и регулировки ставят в следующие положения:

- а) переключатель «Питание» питание прибора — во включенное положение;

- б) переключатели питания В8 и В11, переключатель нормального элемента В4 и переключатель В3 — в положение «В»;
- в) переключатель В10 полярности потенциометра «+», «-» — в положение «+»;
- г) кнопки «грубо» и «точно» — в отжатое положение;
- д) переключатель «Род работы» — в положение «Поверка»;
- е) переключатель пределов — в положение «х1» при измерении ЭДС до 50 мВ;
- з) переключатель линии — в положение «0»;
- к) секционированный переключатель и реохорд — в положение «0».

2.4.3. Проведение установки (контроля) рабочего тока потенциометра, для чего необходимо:

- а) установить переключатель В5 в положение «К»;
- б) установить стрелку гальванометра в положение «0» рукояткой «грубо» и «точно» реостата «Рабочий ток»: вначале при нажатой кнопке «грубо», а затем «точно».

Затем поверяемый прибор подсоединяют к зажимам Х, соблюдая полярность.

Устанавливают переключатель В5 в положение «И».

2.4.4. Определение времени установления показаний.

После прогрева (3–5 мин.) поверяемого потенциометра можно приступить к определению времени установления показаний. Для этого следует предварительно отметить положение движка грубого реостата источника регулируемого напряжения, соответствующее подаче на проверяемый потенциометр таких напряжений, при которых указатель и перо устанавливались бы на начальных отметках и отметках, соответствующих 90 % диапазона шкалы этого прибора.

При установке указателя потенциометра, у которого нуль служит началом шкалы, на начальную отметку, напряжение, подаваемое на поверяемый потенциометр, будет отрицательным.

Это явление объясняется наличием устройства температурной компенсации в поверяемом приборе.

Руководствуясь сделанными отметками, грубый реостат резко переводят из положения, соответствующего напряжению начальной отметки потенциометра, в положение, соответствующее 90 % диапазона шкалы, и одновременно включают секундомер и записывают показания.

При достижении полного успокоения указателя, то есть наступления полной компенсации, выключают секундомер и записывают его показания. Определив время установления показаний в одном направлении, ту же операцию продвигают и в обратном направлении.

Время установления показаний для автоматических электронных потенциометров типа КСП не должно превышать 30 сек. В противном случае необходимо выяснить причину отклонения от нормы совместно с преподавателем.

#### 2.4.5. Определение порога чувствительности.

Для определения порога чувствительности потенциометра следует произвести такое минимальное измерение измеряемой величины, которое вызовет заметное на глаз перемещение указателя проверяемого прибора. Определение порога чувствительности изменения напряжения, подаваемого на поверяемый потенциометр, производится с помощью точного реостата источника регулируемого напряжения.

Разность напряжений (подаваемых от источника регулируемого напряжения), измеренных переносным потенциометром в начале и конце опыта, и есть порог чувствительности по абсолютному значению. Порог чувствительности поверяется на трех отметках диапазона измерения напряжения (в начале, середине, конце) как в сторону



убывающих, так и в сторону возрастающих значений измеряемой величины.

Следовательно, порог чувствительности есть то минимальное изменение напряжения, которое достаточно для приведения в действие поверяемого автоматического потенциометра.

Для потенциометров порог чувствительности не должен превышать 0,1 % от диапазона измерения поверяемого прибора.

#### 2.4.6. Поверка показаний.

Поверка заключается в том, что на зажимах поверяемого потенциометра вместо ЭДС термопары подается ЭДС от источника регулируемого напряжения, встроенного в ПП-63. Величина подаваемого напряжения измеряется переносным потенциометром ПП-63.

При помощи ПП-63 устанавливают ЭДС согласно градуировочной таблице той стандартной термопары, с которой должен работать поверяемый прибор.

Величина поправки на температуру свободных концов термопары для ТХК  $E(t_0; 0^\circ\text{C}) = \Delta E t_0'$ , (где  $E = 0,0695$  мВ — поправка на  $1^\circ\text{C}$ ).

$$\Delta E = E_{cp} - E(t_0'; 0^\circ\text{C}).$$

Плавнo подводят стрелку поверяемого прибора к поверяемой отметке шкалы вращением рукоятки реостата «Напряжение».

Измеряют напряжение на поверяемом приборе, для чего в первую очередь устанавливают стрелку гальванометра на «0» вращением рукояток секционированного переключателя и реохорда, в начале при нажатой кнопке «грубо», а затем — «точно».

При установке указателя на поверяемую отметку линия зрения должна быть перпендикулярна к циферблату во избежание ошибок отсчета вследствие параллакса.

У автоматических потенциометров проверяются все оцифрованные отметки шкалы. Каждая отметка проверяется дважды: при прямом и обратном ходе указателя, то есть при повышении и понижении напряжения.

2.4.7. Построение графиков по полученным результатам зависимостей  $E_0(t; t_0) = f(t)$ ;  $E_1(t; t_0) = f(t)$  или  $E_2(t; t_0) = f(t)$  на одних и тех же осях координат.

2.4.8. Вывод о пригодности прибора. Результаты замеров заносят в таблицу.

Проверяемые отметки шкалы прибора	ТЭДС по градуировочной таблице с учетом температуры $t_0$	Показания образцового потенциометра		Погрешности			Вариации	Условия поверки
				абсолютная		приведенная		
		прямой ход	обратный ход	прямой ход	обратный ход			
°C	$E_0$ , мВ	$E_I$ , мВ	$E_2$ , мВ	$\Delta_1$ , мВ	$\Delta_2$ , мВ	%	мВ	°C

2.4.9. Осуществление переградуировки шкалы прибора на заданный преподавателем предел измерения. Какие из сопротивлений измерительной схемы необходимо изменить при этом? Выполнить расчет и организовать постановку опыта.

## 2.5. Составить отчет о работе

Отчет состоит из краткого описания работы, которое включает:

- 1) цель и содержание работы;
- 2) измерительную схему потенциометра;
- 3) таблицу с результатами поверки;

- 4) графики;
- 5) заключение о пригодности прибора или причинах его непригодности.

## **2.6. Контрольные вопросы**

1. Как осуществляется автоматическая коррекция на температуру свободных концов термопары?
2. Какие преимущества имеет потенциометрический способ (метод полной компенсации) измерения термо-ЭДС по сравнению с измерением при помощи милливольтметра?
3. Какова точность записи на ленточной диаграмме?
4. Как преобразуется постоянное напряжение разбаланса измерительной схемы в переменное напряжение?
5. Каково допустимое сопротивление внешней измерительной цепи потенциометра и чем оно определяется?
6. Каковы допустимые температуры и влажность окружающего воздуха для потенциометра в рабочих условиях?
7. Как подсчитать основную погрешность комплекта, состоящего из электронного потенциометра и термопары?
8. Опишите принцип действия и конструкцию термопары.
9. Перечислите типы термопар, дайте их сравнительную характеристику.
10. Может ли данный прибор работать с термопарой другой градуировки?

### **Лабораторная работа № 3. Исследование характеристик и поверка автоматического моста**

#### **3.1. Цель и содержание работы**

3.1.1. Цель работы — ознакомиться с принципом измерения температуры комплектом, состоящим из термометра сопротивления и автоматического моста, освоить методику поверки моста, исследовать его характеристики.

#### **3.1.2. Содержание работы**

В процессе выполнения работы студент должен:

- 1) изучить принцип действия прибора;
- 2) ознакомиться с лабораторной установкой;
- 3) произвести поверку автоматического моста с помощью имитатора магазина сопротивления и вычислить погрешности;
- 4) построить градуировочные характеристики (теоретические и экспериментальные);
- 5) сделать заключение о пригодности прибора к эксплуатации;
- 6) составить отчет по работе.

#### **3.2. Теоретические сведения**

Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от температуры. Промышленность выпускает термометры сопротивления нескольких типов. Градуировка термометра сопротивления зависит от материала чувствительного элемента (медь, платина, окислы титана, магния, марганца, кобальта и др.) и его сопротивления при  $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В качестве измерительных приборов, работающих с термометрами сопротивления, используются мосты и логометры.

Мосты делятся на *лабораторные* (неавтоматические) и *производственные* (автоматические).

Принципиальная измерительная схема уравновешенного автоматического моста постоянного тока приведена на рис. Л 3.1.

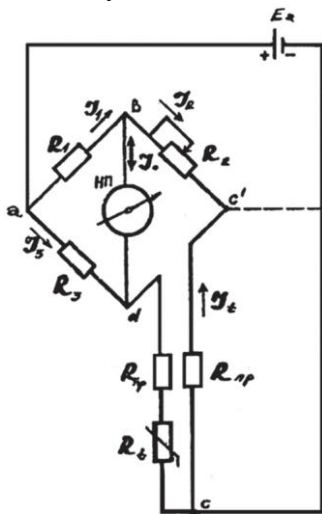
Плечи моста образованы постоянными сопротивлениями  $R_1$  и  $R_3$ , компенсирующим резистором (реохордом)  $R_2$ , термометром сопротивления  $R_t$  и сопротивлением соединительных проводов.

В диагональ  $ac$  включен источник постоянного тока  $E$ , в диагональ  $bd$  — нуль-прибор НП.

При равновесии моста, которое достигается перемещением движка резистора  $R_2$ , сила тока в диагонали моста равна нулю, т. е.  $I_0 = 0$ . Термометр сопротивления может быть подключен к измерительной схеме двумя или тремя проводами.

#### *Двухпроводная схема включения*

Минус источника питания подключается к точке  $c'$ .



При изменении температуры окружающей среды в показания прибора вносится погрешность за счет изменения сопротивления проводов медных или алюминиевых.

Все сопротивления, кроме  $R_t$ , образующие плечи моста, выполнены из манганина, поэтому при изменении температуры окружающей среды остаются постоянными.

Когда колебания температуры окружающей среды велики, то применяют *трехпроводную* схему включения.

Рис. Л 3.1. Схема к лабораторной работе № 3 (1)

Одна из вершин моста переносится к головке термометра  $C$ . При таком соединении сопротивление одного провода прибавляется к  $R_t$ , а сопротивление второго провода — к сопротивлению  $R_2$ . Условие равновесия моста принимает вид:

$$R_1(R_t + R_{np}) = (R_2 + R_{np})R_3.$$

Если  $R_1 = R_3$  — симметричный мост, то

$$R_t + R_{np} = R_2 + R_{np}.$$

Таким образом, в трехпроводной схеме изменение сопротивления соединительных проводов не влияет на результат измерения. Измерительная схема автоматического моста приведена на рис. Л 3.2.

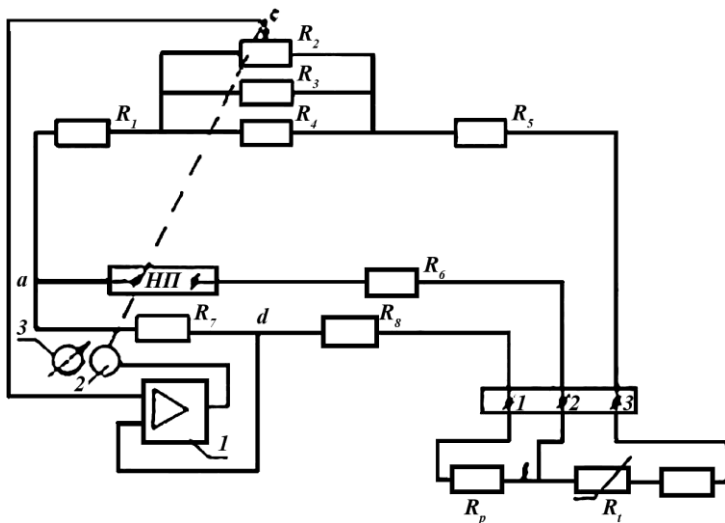


Рис. Л 3.2. Схема к лабораторной работе № 3 (2)

Мост состоит из четырех плеч, образованных сопротивлениями:

$R_1, R_7$  — постоянные резисторы;

$R_p$  — регулировочный реохорд;

$R_2$  — шунтирующее сопротивление;

$R_4$  — для изменения диапазона шкалы прибора;

$R_3$  — для изменения начальной отметки шкалы прибора.

Сопротивление  $R_8$  соответствует сопротивлению  $R_1$  для контрольной отметки на шкале прибора.

Питание измерительной цепи осуществляется напряжением 6,3 В переменного тока в диагонали  $ab$ .

Сопротивление реохорда  $R_p$  включено в два смежных плеча. Обмотка реохорда шунтируется сопротивлениями  $R_2$  и  $R_4$ .

Сопротивления резисторов  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_8$  мостовой схемы определяются расчетным путем для каждой градуировки и предела измерения прибора. Резистор  $R_6$  служит для снижения напряжения питания измерительной цепи до 1,5 В.

Первичный преобразователь (термометр сопротивления)  $R_t$  подключается к прибору соединительными проводами, имеющими одинаковое сопротивление.

Третий соединительный провод цепи термометра вводят с целью уменьшения погрешностей прибора от изменения сопротивления соединительных проводов при отклонении температуры окружающей среды от нормальной. Измерительная диагональ  $cd$  подключена ко входу следящей системы, состоящей из усилителя 1 и реверсивного электродвигателя 2.

Электродвигатель через редуктор связан с ползунком реохорда, указателем 3 и пером.

При изменении контролируемой температуры в объекте меняется сопротивление термометра, что приводит к нарушению равновесия мостовой схемы. В измерительной диагонали появляется напряжение рассогласования, которое усиливается усилителем и приводит во вращение электродвигатель, перемещающий скользящий контакт реохорда до наступления уравнивания мостовой измерительной схемы. В этом случае двигатель останавливается и стрелка отсчетного устройства показывает новое значение температуры в объекте.

### 3.3. Описание лабораторной установки

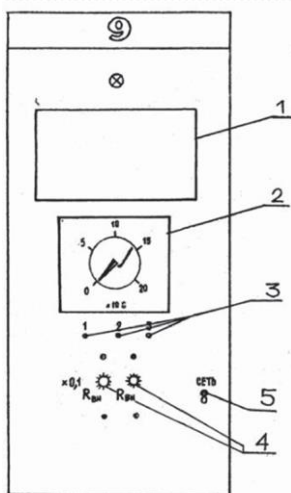


Рис. Л 3.3. Лицевая панель лабораторного стенда

На лицевой панели лабораторного стенда (рис. Л 3.3) смонтирована измерительная схема моста 1, автоматический мост 2, колодка зажимов моста 3, декады магазинов сопротивления 4 для изменения сопротивления соединительных линий, в диапазоне 0–1 Ом с шагом 0,1 Ом, тумблер 5 включения питания.

На приставке к стенду установлен магазин сопротивлений Р4831, служащий имитатором термометра сопротивления.

### 3.4. Порядок и методика выполнения работы

3.4.1. Определение технических характеристик приборов и заполнение таблицы.

Тип градуировки	Предел измерен.	Класс точности	Цена деления	Сопротивление линии	Примечание

3.4.2. Проверка исправности прибора.

Собрать схему для поверки моста в соответствии с рис. Л 3.2.

К клеммам 1, 2, 3 через добавочные резисторы 4 подключить образцовый магазин сопротивления (Р33) Р4831; установить в нулевое положение. Включить тумблером 5



питание лабораторной установки. Переключатель в измерительном блоке прибора установить в положение «Контроль».

Клеммы 1, 2, 3 автоматического моста замыкаются и параллельно резистору подключается добавочное сопротивление, что вызывает разбаланс схемы. Указатель должен устанавливаться против красной отметки на шкале с погрешностью  $\pm 3$  мм.

### 3.4.3. Поверка показаний.

Переключатель в измерительном блоке моста перевести в положение «Работа тока».

Поверка автоматического моста заключается в сравнении показаний с действительными значениями, определяемыми по градуировочной таблице.

Образцовый магазин сопротивления, подключенный к мостовой схеме, служит калиброванным сопротивлением, имитирующим термометр сопротивления. Изменяя сопротивление образцового магазина сопротивления в соответствии с градуировочной таблицей, совмещают стрелку прибора с поверяемой отметкой шкалы прибора.

Поверка производится по оцифрованным отметкам прибора при прямом и обратном ходе шкалы прибора.

Результаты измерений нужно занести в таблицу и вычислить погрешности.

Отметки шкалы прибора	Сопротивление термометра по градуировочной таблице	Показания образцового магазина		Погрешности прибора			Вариации
		прямой ход	обратный ход	абсолютная		приведенная	
				прямой ход	обратный ход		
°C	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	%	

3.4.4. По полученным результатам построение графиков зависимостей:

$$R_t = f(t); R_I = f(t) \text{ или } R_2 = f(t)$$

на одних и тех же осях координат.

3.4.5. Определение дополнительной погрешности показаний при изменении сопротивления соединительных линий.

В измерительную цепь моста введены уравнивающие катушки, суммарное сопротивление которых составляет сопротивление соединительных линий. Опыт следует производить при изменении сопротивления линии на +20 % от номинального значения. Поверку осуществить на трех отметках шкалы (начало, середина, конец). Результаты поверки занести в таблицу.

Отметки шкалы прибора	Показания образцового магазина сопротивления		Погрешности	
	при $R_{вн}$	при $R_{вн} + 20 \%$	абсолютная $R_{вн} + 20 \%$	приведенная $R_{вн} + 20 \%$
°C	Ом	Ом	Ом	%

3.4.6. Составление заключения о пригодности прибора.

3.4.7. Теоретическое изменение схемы подключения термометра сопротивления и прогноз относительно погрешностей измерения.

3.4.8. Осуществление переградуировки шкалы прибора на заданный преподавателем предел измерения. Какие из сопротивлений измерительной схемы необходимо изменить при этом? Выполнить расчет и организовать постановку опыта.

### **3.5. Составление отчета по работе**

Необходимо в отчете дать краткое описание работы (цель, содержание, характеристики приборов), одну из измерительных схем, таблицы с результатами проверки, графики, заключение о пригодности прибора.

### **3.6. Контрольные вопросы**

1. Что такое градуировочная характеристика термометра сопротивления?
2. Охарактеризуйте двух- и трехпроводные схемы подключения термометра сопротивления и укажите их особенности.
3. Каковы устройство и принцип действия автоматического и неавтоматического мостов?
4. Может ли работать один и тот же мост с различными типами термометров сопротивления?

## **Лабораторная работа № 4.**

### **Исследование характеристик и режимов работы логометра**

#### **4.1. Цель и содержание работы**

1. Ознакомление с измерительными приборами, работающими в комплекте с термометрами сопротивления.
2. Освоение методов поверки производственных логометров, определение его технических характеристик, исследование различных режимов работы.

##### **4.1.2. Содержание работы**

1. Изучение методов измерения температуры с помощью сопротивления.
2. Изучение измерительных приборов, работающих в комплекте с термометрами сопротивления, определение их технических характеристик.
3. Поверка логометра и исследование режимов его работы.
4. Составление отчета.

#### **4.2. Теоретические сведения**

Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении их температуры.

Температурный коэффициент электрического сопротивления проводников положителен (сопротивление возрастает при повышении температуры), а полупроводников — отрицателен (сопротивление понижается при повышении температуры).

Таким образом, омическое сопротивление проводника или полупроводника представляет некоторую функцию от температуры:

$$R = f(t).$$

Серийно выпускаются платиновые термометры сопротивления ТСП для температур от  $-200$  до  $+550$  °С, медные ТСМ для температур от  $-50$  до  $+180$  °С.

Как платиновые, так и медные термометры сопротивления выпускаются нескольких градуировок, которые отличаются друг от друга начальным сопротивлением.

Для измерения температуры термометрами сопротивления необходим комплект, который включает в себя следующие элементы:

- 1) термометр сопротивления;
- 2) измерительный прибор (уравновешенный мост, неуравновешенный мост, логометр);
- 3) соединительные провода.

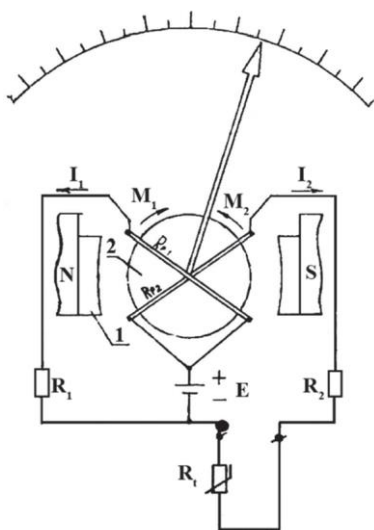


Рис. Л 4.1. Конструкция логометра

Логометры являются магнитоэлектрическими приборами, подвижная система которых состоит из скрещенных под острым углом и жестко связанных между собой рамок. На схеме (рис. Л 4.1) сопротивления рамок обозначены как  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$  (обычно рамки имеют одинаковое число витков, поэтому  $R_{p1} = R_{p2}$ ). Магнитная система логометра состоит из постоянного магнита  $I$  с полюсными наконечниками и неподвижного стального сердечника 2.

Воздушный зазор между сердечником 2 и полюсными наконечниками увеличивается от центра полюсных наконечников к их краям.

Благодаря этому магнитная индукция уменьшается от центра к краям примерно по квадратичному закону. Подвод тока к рамкам производится через спиральные пружины с малым противодействующим моментом, эти же пружинки обеспечивают возврат стрелки в исходное положение при отключении источника питания. Таких пружинок в логометре три. Рамки получают питание от одного источника с напряжением  $E$ , в цепь первой рамки включено постоянное напряжение  $R_1$ , а в цепь второй рамки — постоянное сопротивление  $R_2$  и сопротивление термометра  $R_t$ . Постоянные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  выполняются из магнита. Вращающие моменты рамок  $M_1$  и  $M_2$  направлены навстречу друг другу. Подвижная система находится в покое, когда вращающиеся моменты рамок равны, т.е.  $M_1 = M_2$ .

Учитывая, что

$$M_1 = B_1 \cdot I_1; M_2 = B_2 \cdot I_2,$$

где  $I_1, I_2$  — токи рамок,

$B_1, B_2$  — магнитная индукция в соответствующих зонах расположения рамок, условие равновесия можно записать в следующей форме:

$$B_1 \cdot I_1 = B_2 \cdot I_2.$$

Допустим, что в начальном состоянии  $R_1 = R_2 + R_t$ .

В таком случае при  $R_1 = R_2$  токи рамок равны, и подвижная система займет положение, симметричное относительно оси магнитной системы. При повышении температуры контролируемой среды сопротивление термометра  $R_t$  возрастает, что приведет к уменьшению тока  $I_2$  и вращающего момента  $M_2$  второй рамки. В результате равновесие нарушится, и подвижная система поворачивается по часовой

стрелке, причем рамка 2 переходит в зону большей, а рамка 1 — в зону меньшей магнитной индукции.

В определенном положении подвижной системы вновь наступит равновесие.

Можно считать, что каждому положению подвижной системы, характеризующемуся углом поворота  $\alpha$ , соответствует определенное соотношение магнитной индукции, т. е.

$$\frac{B_2}{B_1} = f(\alpha).$$

Из выражений, приведенных выше, следует, что в установившихся соотношениях

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2}{B_1} = f(t).$$

Преобразуем полученное соотношение, заменив:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_p}; I_2 = \frac{E}{R_2 + R_{p2} + R_t}.$$

Тогда

$$\frac{R_2 + R_{p2} + R_t}{R_1 + R_{p1}} = f(\alpha).$$

Таким образом, угол поворота подвижной системы логометра зависит от соотношения сопротивлений цепи рамок и в принципе не зависит от величины напряжения источника питания.

Однако практически при больших изменениях напряжения наблюдается зависимость, что связано с перегревом рамок и пружинок при повышении напряжения, увеличением роли противодействующего момента пружинок и момента трения в опорах при понижении напряжения.

Из выражения следует, что при постоянных сопротивлениях  $R_{p1}$ ;  $R_{p2}$ ;  $R_1$ ;  $R_2$  угол поворота подвижной системы можно рассмотреть как функцию только сопротивления термометра, т. е.

$$\alpha = F(R_t).$$

Для увеличения чувствительной рамки логометра включают в мостовую схему, позволяющую осуществлять температурную компенсацию. В логометре используется неуравновешенная мостовая схема.

На рис. Л 4.2 представлена измерительная мостовая схема логометра с манганиновыми резисторами. Мост образован постоянными резисторами  $R_1$ ;  $R_2$ ;  $R_3$ ;  $R_6$  и термометрами сопротивления  $R_t$ .

В диагональ  $cd$  включается источник постоянного напряжения.

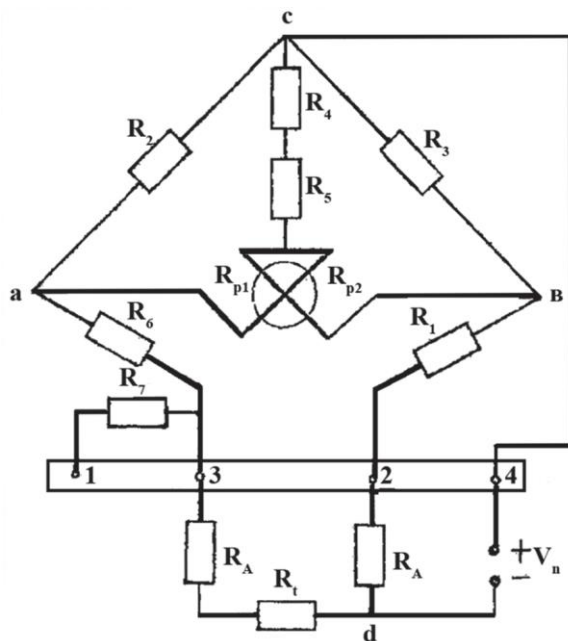


Рис. Л 4.2. Схема к лабораторной работе № 4 (1)



Напряжение питания логометра 4 В.

Рамки включены последовательно между противоположными вершинами моста, образуя измерительную диагональ  $ab$ .

Средняя точка между рамками соединена через последовательно включенные медный  $R_5$  и марганцевый  $R_4$  резисторы с вершиной моста, к которой подведен один провод источника питания, второй провод источника питания подключен к противоположной вершине.

Резистор  $R_4$  служит для изменения угла отклонения подвижной системы, а  $R_5$  — для температурной компенсации.

Для обеспечения большой чувствительности мостовая схема прибора симметрична, т. е.  $R_2 = R_3$ .

Термометр сопротивления подключается по трехпроводной схеме, т. е. исключается влияние колебаний температуры окружающей среды на показания логометра, т. к. соединительные провода при этом включены в разные плечи моста.

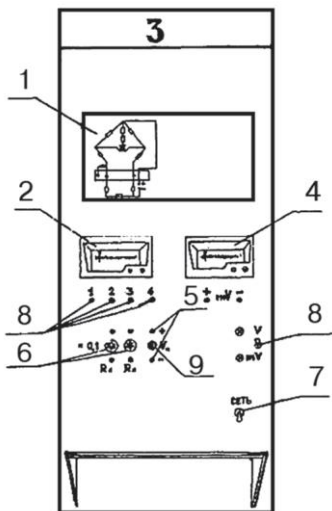


Рис. Л 4.3. Лицевая панель лабораторного стенда (1)

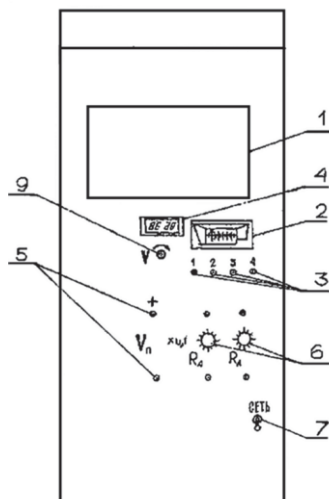


Рис. Л 4.4. Лицевая панель лабораторного стенда (2)

Изменение сопротивления термометра вызывает изменение тока в одной из рамок и поворот подвижной системы прибора до достижения равновесия, т. е. измерение выполняется методом непосредственной оценки.

Возможно включение термометра по двухпроводной схеме. В этой схеме минус источника питания присоединяют к клемме 2 логометра. При этом оба соединительных провода оказываются включенными в одно плечо последовательно с сопротивлением  $R_6$  и  $R_7$ .

### 4.3. Описание лабораторной установки

Общий вид стенда лабораторной установки представлен на рис. Л 4.3 и Л 4.4. На лицевой панели стенда представлены:

- 1 — измерительная схема;
- 2 — логометр;
- 3 — колодка зажимов логометра;
- 4 — вольтметр;

- 5 — источник питания с клеммами «+» и «-»;
- 6 — декады магазинов сопротивления;
- 7 — тумблер включения питания стенда;
- 8 — переключатель;
- 9 — ключ или ручка реостата.

На приставке к стенду устанавливается образцовый мост постоянного тока МО-62.

С помощью вольтметра 4 контролируют напряжение питания логометра, изменение напряжения питания обеспечивается поворотом ручки ключа или реостата 9.

Декады магазинов сопротивления 6 служат для изменения сопротивления соединительных линий.

Переключатель 8 на рис. Л 4.3 служит для выбора режима работы прибора 4. При переводе ключа 8 в положение V прибор работает в режиме вольтметра.

На стенде (рис. Л 4.4) напряжение питания контролируется цифровым вольтметром. В образцовый мост встроены калиброванные сопротивления, которые используются для имитации термометра сопротивления.

#### 4.4. Порядок и методика выполнения работ

4.4.1. Определение технических характеристик приборов и заполнение таблицы.

№	Тип прибора	Тип градуировки	Предел измерения	Класс точности	Цена деления	Сопротивление соединительных линий

4.4.2. Проверка контрольной точки.

Собрать схему в соответствии с рис. Л 4.5, где:

I — клеммы логометра;

2 — мост МО-62;

3 — схема подключения резисторов в МО-62.

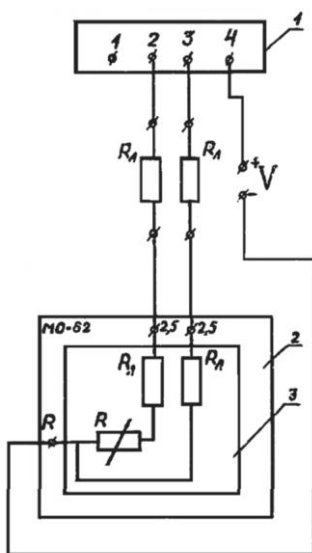
Переключатели декад магазинов сопротивлений  $R_n$  и магазинов сопротивлений моста МО-62 установить на нулевые деления. Провод с клеммы 3 перебросить на клемму 1 логометра.

Включить тумблеры питания стенда. Поворотом ручки ключа или реостата 9 установить напряжение питания 4 В (измеряется вольтметром).

Стрелка логометра должна устанавливаться на контрольной отметке; необходимо изменить сопротивление  $R_n$  с помощью магазина сопротивлений, подключенного к клемме 1 логометра.

#### 4.4.3. Поверка температурной шкалы прибора.

Провод с клеммы 1 подключить к клемме 3 логометра (переключение в схеме производить при отключении питания стенда). Включить питание, установив напряжение 4 В.



Поверка шкалы логометра проводится с помощью калиброванного магазина сопротивлений, имитирующего термометр сопротивления.

Поверяются оцифрованные отметки шкалы при прямом и обратном ходе стрелки прибора.

Результаты измерений занести в таблицу и вычислить погрешности.

Рис. Л 4.5. Схема к лабораторной работе № 4 (2)

№	Показания				Погрешности			Вариации	
	логометра		магазина сопротивления		абсолютная		приведенная, относительная	абсолютная	приведенная
	по градуир. табл.	по шкале	прямой ход	обратный ход	прямой ход	обратный ход			
	Ом	°С	Ом	Ом	Ом	Ом	%	Ом	%

4.4.4. Определение дополнительной погрешности, вызванной изменением напряжения питания на  $\pm 20$  % от номинального значения.

Влияние напряжения на точность измерений определяют путем сравнения результатов измерений на трех отметках шкалы (начало, середина, конец) при прямом ходе стрелки прибора.

Результаты измерений необходимо занести в таблицу и вычислить погрешности.

№	Показания				Погрешности			
	лого-метра	магазина сопротивления			абсолютная		приведенная	
		V	V +20 %	V -20 %	V +20 %	V -20 %	V +20 %	V -20 %
	°C	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	%	%

4.4.5. Определение дополнительной погрешности, вызванной изменением сопротивления линии на  $+20$  % от номинального.

Переключатели декад магазинов сопротивлений 6 (рис. Л 4.3) установить на деления, соответствующие приросту сопротивления  $R_d$  в каждой соединительной линии.

Результаты измерений на двух отметках шкалы занести в таблицу и вычислить погрешности.

4.4.6. Проверка логометра при двухпроводной схеме подключения термометра сопротивления.

Продумать схему подключения МО-62 к стенду при двухпроводной схеме включения термометра сопротивления. Выполнить поверку логометра при нормальном  $R_d$  и при  $R_d + 20\%$ . Результаты измерения занести в таблицу и вычислить погрешности.

№	Показания			Погрешности	
	логометра	магазина сопротивления		абсолютная	приведенная
		$R_d$	$R_d + 20\%$		

4.4.7. Формирование заключения о пригодности прибора к эксплуатации.

4.4.8. Теоретическая оценка возможности подключения к логометру термометра сопротивления другой градуировки.

Следует организовать постановку опыта.

## 4.5. Оформление отчета о работе

В отчете необходимо дать краткое описание работы (цель, содержание, характеристики приборов), привести одну из схем, таблицы поверки, заключение о годности прибора.

#### **4.6. Контрольные вопросы**

1. Каков принцип действия логометра?
2. Какие существуют схемы подключения термометра сопротивления?
3. Как влияют на показания логометра колебания напряжения питания?
4. За счет чего может измениться сопротивление соединительных линий?

## **Лабораторная работа № 5.**

### **Деформационные приборы для измерения давления**

#### **5.1. Цель и содержание работы**

##### **5.1.1. Цель работы.**

Целью работы является освоение техники измерений и закрепление знаний студентов по разделу «Деформационные приборы для измерения давления»

В процессе выполнения этой работы студент должен:

1. Ознакомиться с устройством деформационных приборов давления и вакуума, определить их технические характеристики.
2. Научиться правильно пользоваться приборами для измерения давления и оценивать их погрешности и поправки.

##### **5.1.2. Содержание работы.**

1. Ознакомиться с представленными на стенде различными деформационными (пружинными) манометрами для измерения давления и их основными техническими данными.
2. Ознакомиться с представленными на данном учебном стенде плакатами, схемами, таблицами и обязательной при поверке технической документацией.
3. Ознакомиться с устройством и работой грузопоршневого манометра.
4. Произвести поверку показаний двух манометров (лабораторного и технического) в следующем порядке:
  - а) подготовить грузопоршневой манометр к производству испытаний;
  - б) подготовить и подключить к грузопоршневому манометру в первую очередь лабораторный манометр;



- в) произвести поверку показаний лабораторного пружинного манометра путем сравнения с эталонными грузами;
- г) подготовить и подключить к поршневому манометру технический пружинный манометр;
- д) произвести поверку технического пружинного манометра методом сравнения его с показаниями лабораторного (образцового) манометра;
- е) составить отчет по поверке лабораторного и технического пружинных манометров и дать обоснованное заключение о пригодности проверяемых приборов к эксплуатации.

## 5.2. Краткие теоретические сведения

Деформационные манометры — технические приборы, наиболее широко применяемые для измерения избыточного давления и вакуума в жидкости, газе и паре. Манометры этого типа имеют очень большой диапазон измерения, просты по конструкции, дешевы и надежны в эксплуатации.

Работа пружинных манометров основана на связи упругой деформации специального элемента (пружины) с давлением, подводимым внутрь элемента или к его наружной части.

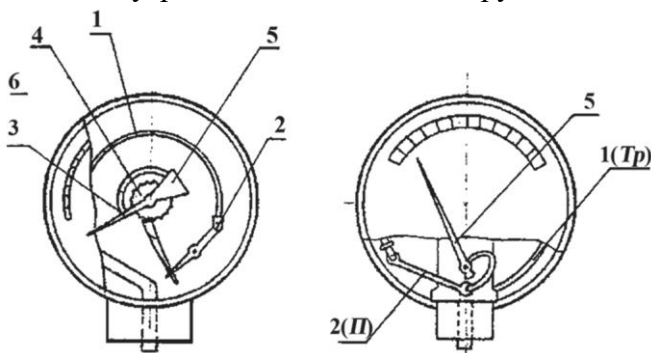


Рис. Л5.1. Конструкция деформационного прибора для измерения давления: 1 — трубчатая пружина; 2 — поводок; 3 — зубчатый сектор; 4 — трибка; 5 — стрелка; 6 — стальная пружина

В технических манометрах применяются упругие элементы четырех типов: одновитковые трубчатые пружины (трубки Бурдона), многovitковые (геликоидальные и спиральные) трубчатые пружины, плоские мембраны и гормоноквитковые мембраны (сильфоны).

Соответственно этому различают трубчатые (первые два типа упругих элементов) и мембранные манометры.

Манометрическая пружина (упругий элемент) преобразует давление в перемещение или усилие.

Перемещение пружины используется затем для передвижения стрелки по шкале показывающего и самопишущего прибора.

Наиболее широко применяются приборы (манометры, вакуумметры, мановакуумметры и дифанометры) с одновитковой трубчатой пружиной.

Основная деталь прибора с одновитковой трубчатой пружиной — согнутая по дуге окружности трубка эллиптического или плоскоовального сечения (рис. Л 5.1). Одним концом трубка помещена в держатель, оканчивающийся ниппелем с резьбой для присоединения к полости, в которой измеряется давление. Внутри держателя есть канал, соединяющийся с внутренней полостью трубки.

Если в трубку подать жидкость, газ или пар под избыточным давлением, то кривизна трубки уменьшится и она распрямится: при создании разрежения внутри трубки кривизна ее возрастает и трубка скручивается. Так как один конец трубки закреплен, то при изменении положения трубки ее свободный конец перемещается по траектории, близкой к прямой, и при этом воздействует на передаточный механизм, который поворачивает стрелку показывающего прибора.

Свойство изогнутой трубки некруглого сечения изменять величину изгиба при изменении давления в ее полости является следствием изменения формы сечения.

Под действием давления внутри трубки эллиптическое или плоскоовальное сечение, деформируясь, приближается к круглому сечению (малая ось эллипса или овала увеличивается, а большая уменьшается). Перемещение свободного конца (которое составляет несколько миллиметров) передается к стрелке прибора передаточным механизмом — секторным или рычажным.

В секторных механизмах движение конца трубки 1 передается через поводок 2 и зубчатый сектор 3 с осью вращения в точке 0 на маленькое зубчатое колесо 4, жестко скрепленное со стрелкой 5 прибора.

Устройство поршневого манометра, предназначенного для контрольных измерений, показано на рис. Л 5.2.

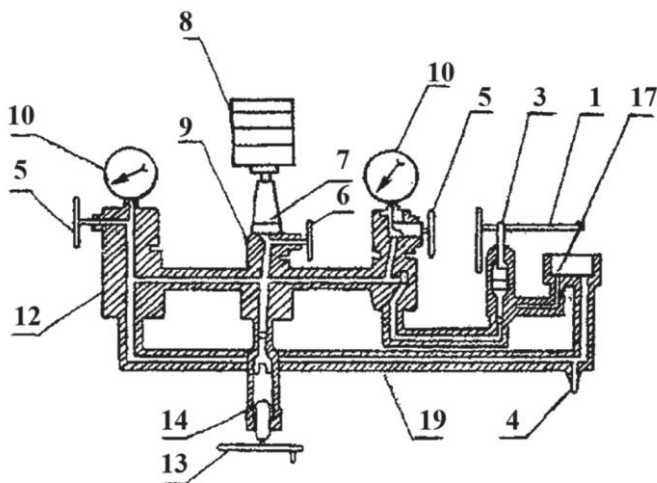


Рис. Л 5.2. Устройство поршневого манометра

Стальной сосуд 19 заполняют трансформаторным маслом. Вертикальный цилиндр 9 имеет шлифованный канал, в который вставляют шлифованный поршень 7 с тарелкой для груза 8. В штуцер 12 ввертывают поверяемые манометры 10. Игольчатые винты 6 и 5 и служат для

перекрытия каналов, вентиль 4 для спуска масла. Рабочее давление в сосуде определяется выбором величины груза 8:

$$p = \frac{G}{F},$$

где  $G$  — вес груза и поршня;

$F$  — сумма площади поршня и половины площади зазора.

Перемещение поршня 7 вызывает подъем штока с грузом.

Порядок работы с поршневым манометром должен быть следующим. После установки в штучере 12 поверяемых манометров в рабочий сосуд 19 поршневого манометра подается масло и с помощью поршня 7 и груза 8 добиваются заданной величины рабочего давления.

### 5.3. Средства, условия и правила поверки

1. Для поверки рабочих пружинных манометров допускается применение следующих образцовых приборов:
  - а) пружинных манометров классов точности 0,2 и 0,35;
  - б) поршневых манометров 3-го и 8-го разрядов с соответственно допустимыми (предельными) погрешностями 0,5–0,1 и 0,1–0,3 %.

Для поверки рабочих манометров на месте их установки служат контрольные манометры, имеющие две трубчатые пружины и две стрелки. Контрольные манометры с секторным механизмом имеют концентрическую шкалу класса 0,5, а с рычажным механизмом — эксцентрическую шкалу класса 1.

2. При выборе того или другого образцового прибора необходимо руководствоваться следующим:
  - а) предельное давление образцового прибора должно быть не меньше предельного давления

поверяемого прибора, а номинальное значение давления поверяемого прибора не менее начальной трети от предельного давления образцового прибора;

- б) допустимая погрешность образцового прибора должна быть в четыре раза меньше допустимой погрешности поверяемого прибора.

Условия и правила поверки:

1. Поверку пружинных трубчатых и пластинчатых манометров производят в лаборатории, сличая показания прибора с действительной величиной созданного в нем давления, измеренного образцовым манометром, или сопоставляя с количеством и весом грузов, накладываемых на тарелку поршневого манометра.
2. Образцовый манометр должен быть вполне исправным, иметь непросроченное свидетельство его государственной поверки, пломбу и находиться в рабочем состоянии.
3. Температура окружающей среды при поверке не должна отличаться от нормальной ( $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) более чем на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
4. Приборы с предельным давлением до  $1,6\text{ кг/см}^2$  включительно проверяют при помощи сжатого воздуха. При поверке приборов с предельным давлением свыше  $1,6\text{ кг/см}^2$  прессы и другие проверочные установки должны быть заполнены жидкостью небольшой вязкости, а весь воздух из них удален.
5. Прибор должен поверяться в том положении, в котором он находится в рабочем состоянии.
6. Поверка манометров класса 1; 1,5; 2,5 должна производиться не менее чем на пяти отметках, а более высокого класса — на четырех и трех отметках, распределенных равномерно в пределах всей шкалы поверяемого манометра.

## 5.4. Порядок и методика выполнения работ

5.4.1. Оценить технические характеристики приборов и заполнить таблицу ниже.

№	Тип прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления

5.4.2. В соответствии с заданием, изложенным выше, студентам необходимо произвести поверку двух пружинных манометров:

- 1) лабораторного пружинного манометра путем сравнения с эталонными грузами;
- 2) технического пружинного манометра способом сравнения его показаний с показаниями лабораторного (образцового) манометра.

Поверка производится с помощью поршневого манометра, описание которого давалось в данной инструкции.

Предварительно с помощью установочных винтов поршневой манометр устанавливают по уровню.

Для выполнения первой части практического задания, то есть для поверки пружинного лабораторного манометра, необходимо:

1. В один из штуцеров (левый) вставить лабораторный пружинный манометр. При этом нужно проследить, чтобы вентили 4, 5, 6 были закрыты.
2. Включить лабораторный манометр на поверку. Для этого открыть вентили 5 и 6.
3. Произвести поверку пяти контрольных точек лабораторного манометра при возрастающем давлении (прямой ход). Для этого:
  - а) на тарелку 8 поршневого манометра положить груз, соответствующий первой контрольной точке (необходимо учесть вес самого поршня с тарелкой, равный 1 кг);

- б) с помощью винтового пресса вращением рукоятки 13 создать необходимое давление так, чтобы поднять шток 7 с грузом на некоторую высоту (высота поднятия контролируется по риску на теле штока);
  - в) легким толчком сообщить грузу вращательное движение;
  - г) запись показаний произвести до постукивания пальцем по корпусу лабораторного манометра и после постукивания;
  - д) предохраняя шток от резкого опускания (поддерживая его рукой), на тарелку поместить груз, соответствующий второй контрольной точке, и вращением рукоятки 13 создать давление, необходимое для установки штока на уровень риски и т. д.
4. После выдержки в течение 5 минут в конце шкалы произвести поверку тех же контрольных точек лабораторного манометра при снижении давления (обратный ход).

Методика поверки на обратном ходе аналогична.

Для выполнения второй части практического задания, то есть для поверки технического пружинного манометра способом сравнения его показаний с показаниями лабораторного (образцового) манометра, необходимо:

1. Поместить поверяемый манометр на установку. Проследить, чтобы вентили 4, 6, 5 были закрыты.
2. Включить образцовый и поверяемый манометры на поверку. После этого открыть вентили 5.
3. Произвести поверку всех оцифрованных отметок шкалы поверяемого манометра при возрастающем давлении (прямой ход).

Для этого:

- а) с помощью винтового пресса вращением рукоятки 13 создать необходимое давление так, чтобы стрелка поверяемого прибора установилась на оцифрованную отметку;
- б) запись показаний поверяемого и образцового манометров производить до и после постукивания по корпусу поверяемого прибора.

Поверка при обратном ходе аналогична.

Результаты поверки заносят в таблицу.

Действительное давление, кг/см <sup>2</sup>	Показания поверяемого прибора при давлении						Погрешность при давлении (до постукивания)		Вариация, кг/см <sup>2</sup>	Приведенная погрешность, %
	повышающемся			понижающемся						
	Отсчет до постукивания, кг/см <sup>2</sup>	Отсчет после постукивания, кг/см <sup>2</sup>	Смещение стрелки, кг/см <sup>2</sup>	Отсчет до постукивания, кг/см <sup>2</sup>	Отсчет после постукивания, кг/см <sup>2</sup>	Смещение стрелки, кг/см <sup>2</sup>	повышающемся, кг/см <sup>2</sup>	понижающемся, кг/см <sup>2</sup>		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

## 5.5. Отчет по работе

Отчет по работе состоит из:

- 1) краткого описания работы;
- 2) схемы манометра или установки;
- 3) протокола поверки манометра;
- 4) заключения о пригодности прибора к эксплуатации.



## **5.6. Контрольные вопросы**

1. Зачем проводится постукивание по корпусу поверяемого и образцового пружинного манометра?
2. Чем объясняется вариация показаний пружинных манометров?
3. Какие условия необходимо учитывать при выборе манометра?
4. Перечислите конструктивные разновидности пружинных манометров и их особенности.
5. Как проводится поверка показаний рабочего пружинного манометра на месте установки?
6. Что может вызвать появление дополнительных погрешностей?

## **Лабораторная работа № 6.**

### **Исследование систем дистанционных передач**

#### **6.1. Цель и содержание работы**

##### **6.1.1. Цель работы:**

Знакомство с устройством и принципом действия систем передачи показаний на расстояния, применяемых в практике различных производств.

Испытание систем передачи показаний на расстояние, представленных на стенде.

##### **6.1.2. Содержание работы:**

1. Изучение устройства и принципа работы сельсинной дистанционной передачи.
2. Изучение устройства и принципа действия пневматической дистанционной передачи.
3. Изучение устройства и принципа действия дифференциально-трансформаторной системы дистанционной передачи.
4. Проведение испытаний дифференциально-трансформаторной, сельсинной, пневматической систем дистанционных передач. Оценка точности их работы.

#### **6.2. Краткие теоретические сведения**

6.2.1. Назначение и классификация систем дистанционных передач (СДП) и передающих преобразователей (ПП).

СДП предназначены для передачи сигналов измерительной информации на некоторое расстояние. Обычно эти расстояния ограничиваются пределами одного цеха или производства. Необходимость передачи показаний вызывается значительным удалением места наблюдения от места установки датчика и потребностью иметь показания одновременно в нескольких местах. СДП делятся

на электрические и пневматические. Любая ДП включает в себя ряд основных элементов, а именно: датчик (первичный прибор), линию передачи, измерительное устройство (вторичный прибор) и источник энергии.

Датчик-прибор непосредственно измеряет параметр технологического процесса (температуру, давление, уровень, расход и т. д.) и преобразует его на выходе в сигнал, удобный для передачи на расстояние. Датчик состоит из измерительного блока и передающего преобразователя. Измерительные блоки у датчиков различные в зависимости от типа чувствительного элемента и пределов энергии измерения.

Конструктивное выполнение передающих преобразователей зависит от физического смысла, являющегося основой принципа действия того или иного преобразователя.

Линия передачи — устройство, которое служит для передачи сигнала от датчика на измерительное устройство. Линия передачи состоит из проводов (электрические дистанционные передачи) либо из пневмопровода, выполненного из медных или полихлорвиниловых трубок (пневматические дистанционные передачи).

Измерительное устройство (вторичный прибор) — устройство, предназначенное для получения сигнала измерительной информации и воспроизведения его в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем или для дальнейшего использования. Обычно измерительные устройства включают: преобразователь, аналогичный передающему преобразователю, а также показывающее и записывающее устройства. Питание дистанционных передач осуществляется от электрического или пневматического источника энергии; для измерения физического вида сигналов, их усиления, модуляции и кодирования с СДП могут быть включены дополнительные промежуточные преобразователи.

### 6.2.2. Дифференциально-трансформаторная дистанционная передача.

Схема дифференциально-трансформаторной дистанционной передачи представлена на рис. Л 6.1.

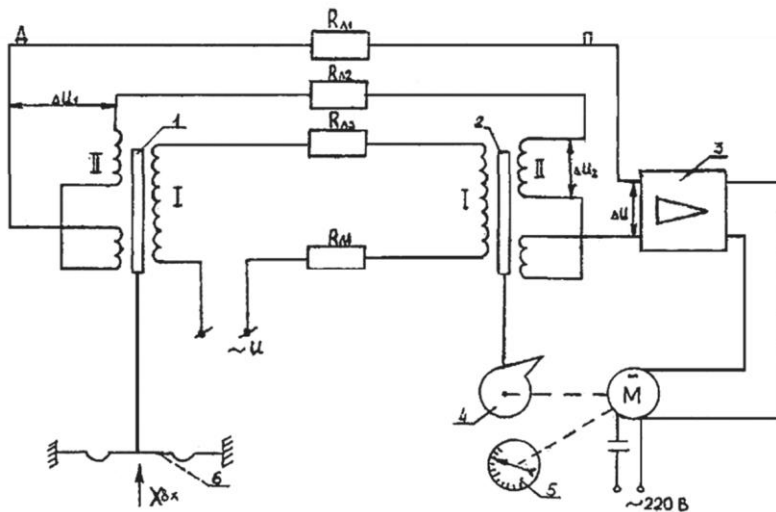


Рис. Л 6.1. Схема к лабораторной работе № 6 (1)

В систему входят два идентичных преобразователя, один из которых находится в первичном приборе Д, а другой — во вторичном приборе П. Каждый из преобразователей имеет одну первичную I и две вторичных II обмотки. Первичные обмотки датчика и приемника соединены последовательно и питаются переменным током от силового трансформатора (25 или 33 В).

Вторичные обмотки включены встречно с выходом на электронный усилитель 3. Благодаря встречному включению секций вторичных обмоток наводимые в них ЭДС смещены по фазе на  $180^\circ$ . Когда сердечник 1 датчика находится в среднем (нейтральном) положении, ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , индуцируемые в каждой из вторичных обмоток, равны и направлены навстречу друг другу.

Следовательно, разность ЭДС во вторичных обмотках равна нулю:

$$\Delta U = e_1 - e_2 = 0.$$

Если сердечник 2 вторичного прибора также находится в среднем положении, то разность ЭДС во вторичных обмотках этой катушки тоже равна нулю:

$$\Delta U_2 = e_3 - e_4 = 0.$$

Следовательно, напряжение на входе электронного усилителя 3 равно

$$\Delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = 0$$

и система находится в состоянии покоя. Измеряемый параметр  $X_{\text{вх}}$  воздействует на чувствительный элемент (мембрана, трубчатая пружина) первичного прибора, который механически связан с плунжером (сердечником). Изменение  $X_{\text{вх}}$  вызывает изменение положения сердечника.

При смещении сердечника первичного прибора от среднего положения изменится распределение магнитных потоков во вторичных обмотках преобразователя  $D$  и индуктируемые в них ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  не будут соответствовать друг другу. Следовательно, на вход усилителя будет подан сигнал, равный разности:  $\Delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2$ .

Величина напряжения является функцией линейного перемещения сердечника преобразователя, а его фаза — функцией направления перемещения от среднего положения. Возникающее напряжение разбаланса усиливается усилителем по напряжению и по мощности и поступает на обмотку управления электродвигателя  $M$ . Последний, вращая кулачок 4, перемещает сердечник 2 вторичного прибора до тех пор, пока не исчезнет сигнал разбаланса  $\Delta U$ . Таким образом, каждому положению сердечника 1 первичного прибора соответствует определенное положение сердечника 2 вторичного прибора.

Дифференциально-трансформаторные системы дистанционной передачи имеют более мощный выходной сигнал и небольшие нагрузки на сердечник первичного прибора, благодаря чему чувствительный элемент не вносит искажений в результат измерений.

Достоинства дифференциально-трансформаторной системы передач:

- а) удобство вывода сигнала из области высокого давления и агрессивных сред;
- б) малая реактивная нагрузка на чувствительный элемент при большом выходном моменте на вторичном приборе;
- в) простота подключения первичного преобразователя к измерительной системе первичного прибора и малые габариты катушки;
- г) высокая чувствительность и хорошая линейность системы передачи.

К недостаткам относятся:

- а) отсутствие взаимозаменяемости, необходимость индивидуальной подгонки каждого элемента комплекта;
- б) уменьшение надежности системы из-за наличия многокаскадного усилителя;
- в) влияние емкости линии практически ограничивает радиус действия до одного километра;
- г) сильное влияние посторонних магнитных полей и ферромагнитных масс.

Дифференциально-трансформаторные катушки в зависимости от их назначения выпускаются с ходом сердечника от 1 до 30 мм. Для катушек, работающих с дифманометрами, стандартная величина хода сердечника лежит в пределах  $\pm 5$  мм, а для катушек, работающих с ротаметрами,  $\pm 10$  мм. Для регулирования величины входного напряжения катушки сердечник в отдельных случаях изготавливается

из двух свинчивающихся половин. Основная погрешность дифференциально-трансформаторной системы при передаче сигнала на расстояние 250 м составляет от 0,5 до 1 %, а на расстояние до 1 км — 2,5 %. Дифференциально-трансформаторные преобразователи применяются в устройствах измерения давления, расхода, уровня и других параметров, значения которых могут быть преобразованы в перемещения сердечника катушки первичного прибора.

### 6.2.3. Сельсинная дистанционная передача.

В ряде случаев возникает необходимость передавать на расстояние сигналы преобразователя в виде нескольких оборотов выходной оси преобразователя или линейного перемещения в несколько метров.

В частности, такая задача ставится при передаче показаний уровнемеров. Решение подобных задач возможно посредством сельсинных передач.

Сельсин представляет собой миниатюрную трехфазную электрическую машину, сходную с синхронным генератором или двигателем.

Статор сельсина имеет одну обмотку (обмотка возбуждения), а ротор — три обмотки (обмотки синхронизации), оси которых сдвинуты на  $120^\circ$ . Существует другая модификация сельсинов — с трехфазной обмоткой возбуждения.

Сельсины подразделяют в зависимости от выполняемой функции в схемах передачи угла. Сельсин, поворотом ротора которого задается передаваемый угол, называют сель-

син-датчиком, а сельсин, ротор которого воспроизводит передаваемый угол, называют сельсин-приемником.

Различают два режима работы сельсинов — индикаторный и трансформаторный. Обмотки возбуждения датчика и приемника включаются в общую сеть питания ( $\sim 110$  В), а одноименные фазные обмотки роторов соединяются между собой.

Магнитные потоки, создаваемые токами обмотки возбуждения (статоров) наводят в обмотках синхронизации ЭДС, величины которых зависят от пространственного положения их относительно обмоток возбуждения. Если магнитный поток возбуждения пересекает обмотку вдоль ее оси, то ЭДС будет минимальной.

Когда ось какой-либо из трех фазных обмоток при повороте ротора составляет с направлением магнитного потока  $90^\circ$ , то ЭДС в этой обмотке принимает нулевое значение. Если ротор СД повернуть на угол  $\alpha$ , то наводимые ЭДС в обмотках синхронизации определяются как:

$$E_1 = E_{max} \cos \alpha ;$$

$$E_2 = E_{max} \cos (\alpha + 120^\circ);$$

$$E_3 = E_{max} \cos (\alpha + 240^\circ).$$

Аналогичная картина будет наблюдаться и во вторичном сельсине-приемнике при его повороте на некоторый угол  $\beta$ .

При согласованном положении роторов ( $\alpha = \beta$ ) наводимые ЭДС будут одинаковы, ток в линии связи отсутствует.

При отклонении ротора сельсина-датчика от согласованного положения наводимые в соответствующих обмотках ЭДС различны по величине и в линиях связи появляются уравнивающие токи.

Возникающий при этом синхронизирующий момент будет определяться формулой:

$$M_{син} = M_{max} \sin \theta,$$

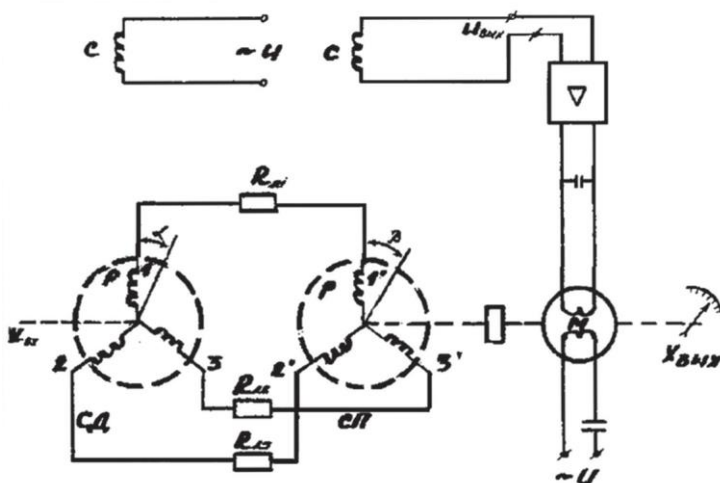
где  $\theta = \alpha - \beta$ ;

$M_{max}$  — наибольший момент при  $\theta = 90^\circ$ .

Ввиду фиксированного положения ротора СД, связанного с чувствительным элементом, в движение придет свободный ротор СП и повернется на угол, соответствующий углу поворота ротора СД. Способность роторов сельсинов



В трансформаторном режиме сельсины включаются по схеме, приведенной на рис. Л 6.2.



Обмотка возбуждения СП не включается в сеть питания и называется управляющей (выходной) обмоткой, сигнал от которой после усиления передается в схему управления исполнительного двигателя  $M$ . Следовательно, трансформаторную схему включения сельсинов используют для увеличения вращающего момента. Напряжение питания подводится к обмотке возбуждения  $СД$ . Наводимые ЭДС в роторных обмотках  $СД$  создадут уравнивающие токи в линиях связи, если  $\alpha \neq \beta$ .

Результирующий магнитный поток, созданный токами цепей синхронизации, индуцирует в управляющей обмотке *СП*  $U_{вых}$ , зависящую от углового положения ротора  $U_{вых} = U_{вых\ max} \sin \theta$ .

Согласованным положением сельсинов в трансформаторном режиме считают положение, при котором ротор или статор *СП* смещен на  $90^\circ$  относительно ротора или статора *СД*. В этом случае в выходной обмотке наводимая ЭДС исчезает, т. е.  $U_{вых} = 0$  (двигатель отключается). При наличии угла рассогласования в управляющей обмотке наводится  $U_{вых}$ , которая усиливается в усилителе и поступает на реверсивный электродвигатель *М*, поворачивающий через редуктор ротор *СП* до согласованного положения, т. е. до достижения  $U_{вых} = 0$ .

В линиях связи все время протекают токи, и изменение сопротивления линии связи влияет на результат измерения.

#### 6.2.4. Пневматические системы передачи.

Принципиальная схема дистанционной пневматической передачи показана на рис. Л 6.3. Как видно из упрощенной схемы пневмопередачи, сжатый воздух подается по трубам *1* через фильтр *2* в редуктор *3*.

Здесь давление снижается и поступает через постоянный дроссель *4* к отверстию сопла *5*. Дроссель представляет собой тонкую короткую трубку диаметром 0,2. Диаметр отверстия сопла больше отверстия дросселя, чтобы при открытом сопле давление в системе сопла за дросселем не возрастало. В результате поворота стрелки *18* прибора отклоняется заслонка *6*, связанная со стрелкой через систему рычагов *11*, *12*, *13*, и давление в системе воздухопровода *7* меняется: увеличивается, если отверстие сопла прикрывается заслонкой, и уменьшается, если оно открыто. Это изменение давления через пневматический усилитель

передается вторичному прибору 9, связанному с системой датчика воздухопровода 8.

Механизм жесткой обратной связи состоит из сильфона 10 и рычагов 14, 15, 16 и осуществляет обратное воздействие воздуха, поступающего на вторичный прибор, на заслонку, что обеспечивает пропорциональность между измеряемым давлением и давлением в трубопроводе 8.

Под действием измерительной системы заслонка приближается к соплу (или удаляется), а под действием обратной связи в результате деформации сильфона 10 она отводится от сопла (или приближается) на некоторое расстояние, но это расстояние меньше того, на которое заслонка приблизилась бы к соплу (или отошла бы от него) под действием одной только измерительной системы датчика.

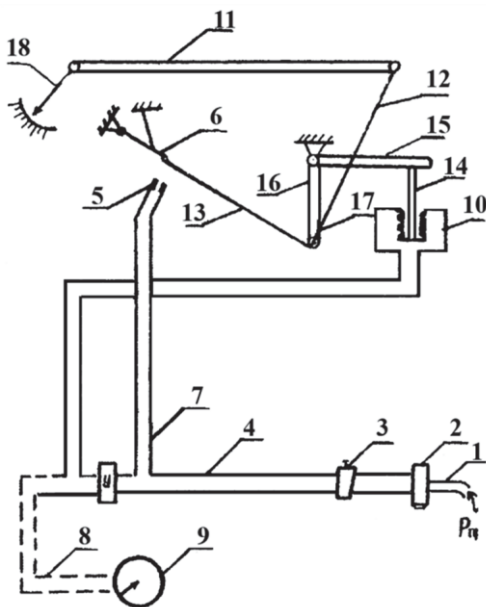


Рис. Л 6.3. Схема  
к лабораторной работе  
№ 6 (3)

Каждому значению измеряемой величины между нулем и максимумом соответствует строго определенное

положение заслонки относительно сопла и, следовательно, строго определенное давление воздуха, поступающего на вторичный прибор. Это давление для систем с усилителями на сильфонах меняется в пределах от 0 до 100 кПа, с усилителями на мембранах — от 20 до 100 кПа.

### **6.3. Описание лабораторной установки**

Схема расположения приборов на лабораторных стендах приведена на рис. Л 6.4 и Л 6.5.

На стенде первичных приборов (рис. Л 6.4) представлены:

- 1 — измерительная схема;
- 2 — манометр с дифференциально-трансформаторным преобразователем типа МЭД;
- 3, 6 — пневматические панели дистанционного управления;
- 4 — сельсин-датчик;
- 5 — манометр с пневматическим преобразователем;
- 7 — тумблер включения питания установки;
- 8, 9 — переключатели.

Панель дистанционного управления 3 служит для создания давления, измеряемого прибором 2 и преобразующего его в унифицированный выходной сигнал переменного тока, основанный на изменении взаимной индуктивности в пределах  $0 \div 10 \text{ мН}$ .

Упругим чувствительным элементом прибора служит трубчатая пружина, внутрь которой подается измеряемое давление. При подаче в прибор давления трубчатая пружина деформируется, что вызывает пропорциональное измеряемому давлению перемещение конца пружины и связанного с ним сердечника дифференциального трансформатора.

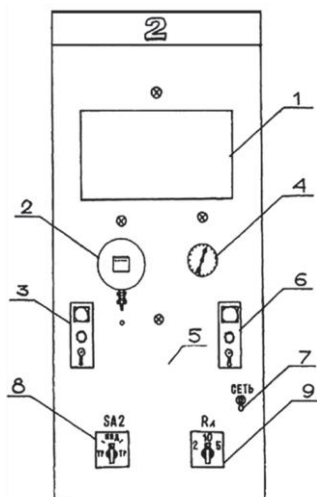


Рис. Л 6.4. Лицевая панель лабораторного стенда первичных приборов

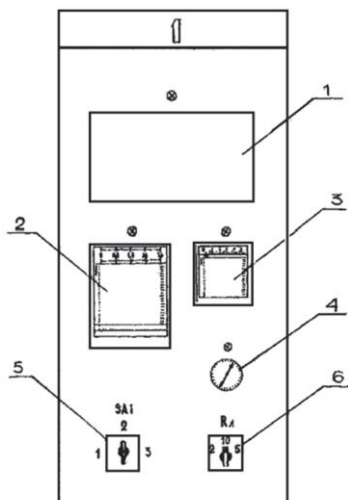


Рис. Л 6.5. Лицевая панель лабораторного стенда вторичных приборов

Панель дистанционного управления 6 служит для создания давления, измеряемого прибором 5 и преобразующего его в унифицированный пневматический сигнал в пределах  $0 \div 100$  кПа.

Переключатель 8 обеспечивает выбор режима работы сельсинной системы дистанционной передачи — индукторный или трансформаторный.

Переключатель 9 служит для изменения сопротивления соединительных линий  $R_n$  сельсинной дистанционной передачи.

На стенде вторичных приборов (рис. Л 6.5) представлены:

- 1 — измерительная схема;
- 2 — прибор КСД-2-002 с дифференциально-трансформаторным преобразователем;
- 3 — вторичный пневматический прибор РПВ4-2Э;
- 4 — сельсин-приемник;
- 5, 6 — переключатели.

Переключатель 5 обеспечивает подключение соответствующих систем дистанционной передачи:

- в положении 1 — сельсинной;
- в положении 2 — дифференциально-трансформаторной;
- в положении 3 пневматической.

Переключатель 6 служит для изменения  $R_d$  соединительных линий дифференциально-трансформаторной передачи.

#### **6.4. Порядок и методика выполнения работы**

6.4.1. Определение технических характеристик приборов и заполнение таблицы, приведенной ниже.

№	Тип прибора	Класс точности	Предел измерения	Цена деления	Выходной сигнал	Входной сигнал

6.4.2. Исследование режимов работы сельсинной системы дистанционной передачи.

Тумблером 7 включить питание лабораторной установки. Ручка переключателя SA1 на стенде вторичных приборов переводится в положение 1. Загораются сигнальные лампы, свидетельствующие о подключении сельсина-датчика и сельсина-приемника.

Переключатель SA2 на стенде первичных приборов переводится в индикаторный режим.

Переключатель 9 устанавливается в положение, соответствующее сопротивлению  $R_d = 5$  Ом.

Стрелка сельсина-датчика устанавливается на заданную поверяемую отметку.

Показания снимаются с сельсина-приемника.

Поверку показаний выполнить при прямом и обратном ходе стрелки прибора. Результаты замеров занести в таблицу и вычислить погрешности.

Повторить поверку тех же отметок прибора при другом сопротивлении  $R_d$ .

Сопротивление	Режим работы	Показания сельсина- датчика	Показания сельсина- приемника		Погрешности			Вариация
			Прямой ход	Обратный ход	абсолютная		Приведенная	
					Прямой ход	Обратный ход		
Ом		град.	град.	град.	град.	град.	%	град.

Перевести ключ  $SA2$  в трансформаторный режим работы сельсинов: стрелка приемника должна установиться на отметку  $90^\circ$ , т. к. только при таком взаимном расположении обмоток возбуждения и синхронизации наводимая ЭДС в обмотке возбуждения минимальная.

Эту отметку считать за начало шкалы (нуль).

Поверку выполнить для тех же отметок при сопротивлении  $R_d = 5$  Ом, а затем при другом сопротивлении.

Результаты замеров записать в ту же таблицу и вычислить погрешности.

#### 6.4.3. Исследование дифференциально-трансформаторной дистанционной передачи.

Переключатель  $SA1$  перевести в положение 2. Загораются сигнальные лампы, свидетельствующие о подключении первичного и вторичного приборов дифференциально-трансформаторной дистанционной передачи. Переключатель 6 на стенде вторичных приборов перевести в положение, соответствующее  $R_d = 20$  Ом.

Переключатель панели управления 3 перевести в ручной режим работы (на стенде). Ручкой редуктора панели дистанционного управления установить стрелку манометра этой панели на первую поверяемую отметку. Показания снимать со шкалы прибора КСД 2.

Поверку выполнить в пределах  $0 \div 1 \text{ кгс/см}^2$  при прямом и обратном ходе стрелок прибора.

Показания, полученные на шкале вторичного прибора, перевести в единицы давления, заполнить таблицу и вычислить погрешности.

№	$R_{\text{д}}$	Показания первичного прибора	Показания вторичного прибора		Погрешности			Вариация
			Прямой ход	Обратный ход	абсолютная		Приведенная	
					Прямой ход	Обратный ход		

Поверку тех же отметок прибора повторить при другом сопротивлении  $R_d$ .

6.4.4. Исследование пневматической дистанционной передачи.

Переключатель *SA1* перевести в положение 3. Загорают-ся сигнальные лампы, свидетельствующие о подключении первичного и вторичного приборов пневматической дистанционной передачи.

Установить давление питания 1,1 или  $1,4 \text{ кгс/см}^2$  редуктором давления. Заданное значение измеряемого давления устанавливается редуктором панели дистанционного управления 6 (рис. Л 6.4). Переключатель панели перевести в ручной режим работы.

Поверку показаний выполнить при прямом и обратном ходе стрелки прибора. Результаты поверки записать в таблицу и вычислить погрешности.



№	Показания первичного прибора	Показания вторичного прибора		Погрешности			Вариация
				абсолютная		приведенная	
		Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход		

## 6.5. Оформление отчета по работе

Отчет должен включать:

1. Краткое описание работы (цель, содержание, характеристики приборов).
2. Принципиальные схемы дистанционной передачи (по указанию преподавателя).
3. Протоколы (таблицы) испытания дистанционных передач.

## 6.6. Контрольные вопросы

1. Какой принцип действия сельсинной передачи в индикаторном режиме?
2. Можно ли в принципе осуществлять передачу сигнала в обратном направлении, т. е. от сельсина-приемника к сельсину-датчику?
3. Влияет ли на точность передаваемого сигнала сопротивление соединительных линий в сельсинной дистанционной передаче?
4. Какое напряжение используется для питания серийных приборов в сельсинной передаче?
5. Опишите принцип действия сельсинной передачи в трансформаторном режиме.
6. Опишите принцип работы дифференциально-трансформаторной системы дистанционной передачи.

7. Как соединяются вторичные обмотки трансформатора друг с другом?
8. Какое напряжение применяют для питания измерительной схемы дифференциально-трансформаторной дистанционной передачи?
9. Для какой цели служит реверсивный двигатель в дифференциально-трансформаторной дистанционной передаче?