

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)**

**Электростальский институт (филиал)  
Московского политехнического университета**

Краткий курс лекций

**«Технические измерения и приборы  
Книга 1: Метрология и средства измерения»**

Направление подготовки

**22.03.02 «Металлургия**

**15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»**

Квалификация (степень) выпускника

**Бакалавр**

Форма обучения

**Очная, очно-заочная, заочная**

**Электросталь 2021**

**Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлениям подготовки: 22.03.02 «Металлургия», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»**

**Автор: Пономарев А.П.**

**Методические указания одобрены на заседании кафедры «Машиностроительные и металлургические технологии» 03.06.2021 протокол №10**

## Содержание

Введение.....	5
Часть 1. Основы метрологии.....	7
Глава 1.1. Основные понятия и определения.....	7
Глава 1.2. Определение числа измерений.....	11
Глава 1.3. Определение суммарной погрешности измерения.....	13
Часть 2. Технические средства и методы измерений.....	16
Глава 2.1. Измерение геометрических размеров.....	16
Глава 2.2. Измерение температуры.....	23
2.2.1. Манометрические термометры.....	23
2.2.2. Термоэлектрические термометры.....	25
2.2.3. Измерение термо-ЭДС.....	26
2.2.4. Термометры сопротивления.....	28
2.2.5. Пирометры излучения.....	33
Глава 2.3. Измерение давления и разрежения.....	39
2.3.1. Единицы давлений.....	39
2.3.2. Приборы для измерения давлений.....	40
Глава 2.4. Измерение расходов.....	43
2.4.1. Методы измерения расходов.....	43
2.4.2. Измерение расходов по перепаду давления.....	43
2.4.3. Расходомеры постоянного перепада давления.....	46
2.4.4. Электромагнитные расходомеры.....	50
2.4.5. Ультразвуковые расходомеры.....	52
2.4.6. Вихревой ультразвуковой расходомер.....	56
2.4.7. Щелевой расходомер (расходомер истечения).....	58
2.4.8. Тепловой расходомер.....	59

Глава 2.5. Измерение уровня жидкости.....	61
2.5.1. Пневмометрический уровнемер.....	61
2.5.2. Сельсинный уровнемер.....	62
2.5.3. Радиоактивные уровнемеры.....	63
Глава 2.6. Измерение плотности жидкости.....	64
2.6.1. Пневмометрический плотномер.....	64
2.6.2. Радиометрический плотномер.....	66
Глава 2.7. Измерение кислотности и щелочности.....	67
2.7.1. Потенциометрический метод.....	67
2.7.2. Кондуктометрический метод.....	70
Заключение.....	72
Библиографический список.....	74



## ДЛЯ ЗАМЕТОК

В данном издании предпринята попытка обобщить в методически апробированной форме имеющиеся в учебниках материалы по курсу «Технические измерения и приборы», дополненные новейшими сведениями.

### Библиографический список

1. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерения. - М.: Высшая школа, 2002. - 206 с.
2. Ранеев Г.Г, Тарасенко А.П. Методы и средства измерений.- М.: Академия, 2006.
3. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи) - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
4. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений - М.: Машиностроение, 1967. - 288 с.
5. Белкин И.М. Средства линейно-угловых измерений; Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. - 432 с.
6. Статистические методы обработки эмпирических данных. Рекомендации. -М.: Изд-во стандартов, 1978. - 254 с.
7. Измерения в промышленности. Справочник в трех книгах /Под ред. П. Профоса. - М.: Металлургия, 1990. - 1126 с.
8. Евтихеев Н.Н., Купершмидт Я.А. и др. Измерение электрических и неэлектрических величин - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 242 с.
9. Куликовский К.А. Методы и средства измерений - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 324 с.

ле, в области контроля технологических процессов и параметров качества продукции.

Понятно, что учебник, рассчитанный на вузовскую программу, не может охватить всех вопросов новой техники, с которыми молодой специалист столкнется в конкретной производственной ситуации. Кроме того, поскольку техника не стоит на месте, знания, почерпнутые из учебника, быстро стареют. К счастью, сегодня имеется много возможностей систематически пополнять свою эрудицию как из периодической литературы, так из сайтов интернета и каталогов фирм. Нелишне отметить, что ныне красочно издаются и своевременно обновляются каталоги ряда компетентных фирм, таких как ProSoft, Siemens, Adventec, Элемер, Эмикон, Метран, Взлет. В процессе изучения курса “Технические измерения и приборы” необходимо развить у студента чувство необходимости постоянного общения с этими источниками информации.

Учитывая возрастающую роль неразрушающего контроля в производстве конкурентоспособной продукции, в книге 2 издания “Технические измерения и приборы” будут изложены основные методы и средства неразрушающего контроля, приведены примеры их широкого использования.

## Часть 1. Основы метрологии

### Глава 1.1. Основные понятия и определения

**Измерением** называется нахождение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Характерной особенностью средств измерений является то, что они должны иметь **нормированные метрологические характеристики**, от которых зависят результаты и точность измерений. Технические средства, не имеющие нормированных метрологических характеристик, не могут быть отнесены к средствам измерений.

Средства измерений (СИ) подразделяются на **меры, измерительные приборы, измерительные системы и измерительные преобразователи**.

**Мера** – средство измерений, предназначенное для воспроизведения значения физической величины. В качестве меры могут использоваться гири, калибры, катушки индуктивности, магазины сопротивлений.

**Измерительный прибор** вырабатывает информацию о контролируемой физической величине в доступной для наблюдения форме. В зависимости от формы представления информации различают аналоговые и цифровые приборы. Показания аналогового прибора (стрелочного) являются непрерывной функцией измеряемой величины. В цифровом приборе аналоговый сигнал преобразуется в цифровой код, и результат измерения высвечивается на цифровом табло с различной разрядностью.

**Измерительная система (установка)** состоит из средств измерений и вспомогательных устройств, которые соединены между собой каналами связи и вырабатывают

сигналы для системы автоматического управления, контроля, регистрации.

**Измерительный преобразователь** – средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в форму, удобную для передачи, обработки или хранения. Измерительные преобразователи подразделяются на первичные измерительные преобразователи (датчики), промежуточные и нормирующие измерительные преобразователи. Нормирующие преобразователи преобразуют измеряемую величину в аналоговый сигнал со стандартным диапазоном измерений (например, 0-5 мА, 4-20 мА, 0-10 В).

Как шутя выражаются метрологи – «все приборы врут». Действительно, даже в случае применения самых совершенных средств измерений неизбежна погрешность, которая обусловлена как несовершенством прибора, так и влиянием условий измерения.

**Погрешность измерения** – это количественная характеристика качества измерения. Она представляется как отклонение результата измерения от **истинного значения**. За истинное значение принимается значение, полученное при использовании прибора более высокого качества (класса).

В зависимости от формы выражения погрешностей, они подразделяются на абсолютные, относительные и приведенные. Абсолютная погрешность равна разнице измеряемой величины и его истинного значения и имеет размерность измеряемой величины. Относительная погрешность определяется как отношение, выраженное в процентах, абсолютной погрешности к истинному значению величины. Приведенная погрешность определяется как отношение, выраженное в процентах, абсолютной погрешности к нормирующему значению. За нормирующее значение принимается диапазон измерений или его часть.

## Заключение

При рассмотрении информации, подготовленной для включения в настоящее издание, было принято во внимание следующее обстоятельство.

Переход к новой экономической формации в России, предпринятый в начале 90-х годов, пока не привел к повышению технико-экономических показателей большинства промышленных предприятий. Уровень производства на многих действующих машиностроительных предприятиях составляет 40-60% от достигнутого ранее уровня. Здесь эксплуатируется в основном устаревшее технологическое оборудование, несовершенные средства измерения и контроля. Поэтому при подготовке молодых специалистов для работы в качестве мастеров и инженеров на промышленных предприятиях необходимо давать им знания по действующему оборудованию и применяемым приборам.

Наряду с этим на ряде предприятий, нашедших свою нишу на мировом и внутреннем рынке, высокотехнологичная, конкурентоспособная продукция выпускается на современном оборудовании с применением новейших приборов и микропроцессорной техники. Кроме того, следует ожидать, судя по зарождающейся динамике и логике развития промышленности, уже в ближайшее время реанимации промышленности на базе новейших технологий, современной техники и автоматизации производства. Молодые специалисты должны быть подготовлены к этому процессу, так как именно им предстоит стать основной движущей силой в осуществлении научно-технического прогресса. Поэтому они должны быть вооружены самыми современными знаниями, как в области избранной профессии, так и в смежных областях науки и техники, в том чис-

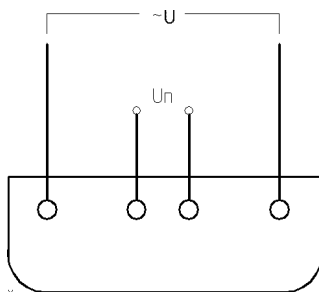


Рис. 2.33. Принципиальная схема кондуктометра

Датчик кондуктометра имеет 4 электрода: два токовых и два потенциальных (измерительных). Для уменьшения влияния поляризации электродов измерение проводится на переменном токе. Кроме того, снижению влияния поляризации способствует применение четырехэлектродного датчика вместо двухэлектродного.

Переменное напряжение подается на внешние электроды. Ток, протекающий между ними, создает на потенциальных электродах падение напряжения, значение которого будет соответствовать кислотности или щелочности раствора. Напряжение с потенциальных электродов подается на измерительный прибор, проградуированный в единицах кислотности или щелочности.

Достоинством кондуктометра является простота конструкции и надежность; недостатком - низкая точность: погрешность кондуктометров обычно оценивается в 10%.

Значение приведенной погрешности используется для обозначения класса прибора. Так, у прибора класса 2,5 значение приведенной погрешности составляет 2,5 %. Зная класс прибора, можно определить значение абсолютной погрешности – она будет равняться (в единицах измерения) произведению приведенной погрешности на диапазон измерения, деленному на 100. Например, для амперметра класса 1,5 с диапазоном измерения 200 А значение абсолютной погрешности прибора будет равно:

$$\frac{1,5 \cdot 200}{100} = 3 \text{ А}$$

**Качество измерения характеризуется суммарной погрешностью измерения.** Рассмотрим составные части суммарной погрешности.

**Основная погрешность** средства измерения - это погрешность СИ, используемого в нормальных условиях. Она определяется качеством изготовления прибора. Нормальные области значений влияющих величин составляют: температура  $20 \pm 5^\circ \text{C}$ , напряжение  $220 \pm 4,4 \text{ В}$ , частота  $50 \pm 1 \text{ Гц}$ , давление  $0,1 \text{ МПа} \pm 10\%$ .

**Погрешность метода измерения** – составляющая погрешности измерения, происходящая от несовершенства метода измерения (наличие влияющих факторов, неточность формулы, несовершенство алгоритма измерения).

**Дополнительная погрешность** вызывается отклонением условий измерения от нормальных (температура помещения, напряжение питания, давление, напряженность магнитных полей, скорость контроля). Обычно дополнительная погрешность в пределах заданных интервалов изменения условий измерения не превышает 0,5 основной погрешности.

**Динамическая погрешность** обусловлена инерционностью средств измерений. Она зависит от характера изменения контролируемого параметра изделия и скорости его

сканирования. В большинстве случаев значение динамической погрешности можно быстро и достаточно точно определить экспериментально, путем контроля с переменной скоростью сканирования опытного образца изделия, имеющего ступенчатое изменение параметра, равное значению основной погрешности прибора. При этом в качестве характеристик динамической погрешности принимаются: значение динамической погрешности, равное половине основной погрешности прибора, и скорость сканирования изделия. В некоторых случаях в качестве характеристики динамических свойств прибора принимается постоянная времени - время установления сигнала, соответствующее появлению динамической погрешности, равной половине основной погрешности прибора.

Для оценки качества измерения используются также такие понятия, как сходимость, воспроизводимость и стабильность.

**Сходимость** измерений – качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполненных в одинаковых условиях.

**Воспроизводимость** измерений – качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполненных в различных условиях (в разное время, разными методами и средствами).

**Стабильность** средства измерений характеризует неизменность (или значение изменения) его метрологических свойств во времени.

По характеру проявления во времени погрешности измерения различаются на систематические и случайные.

**Систематическая** погрешность измерения остается постоянной при повторных измерениях одной и той же величины.

менением температуры раствора. Датчики этих приборов имеют три устройства, погруженные в раствор: измерительный и сравнительный электроды, а также термометр сопротивления.

Настройка рН-метров проводится по специальным буферным растворам, имеющим точное значение рН (погрешность не более 0,1 рН). Значение рН буферного раствора выбирается примерно равным среднему значению рН, которое необходимо поддерживать в аппарате. При этом погрешность измерения оценивается в 0,1 рН.

рН-метры со стеклянным электродом не могут применяться в растворах, содержащих фтор, хлор и другие ионы, в присутствии которых стекло растворяется. Для контроля растворов, содержащих ионы хлора, фтора, брома, йода, серы и других, применяются ионоселективные электроды, представляющие собой специально изготовленные ионитовые мембраны в виде пластин, внешне похожих на искусственную кожу. Кусочек этой пластинки монтируется в пластмассовую трубку, внутреннее заполнение которой аналогично заполнению стеклянного электрода.

Прочность ионоселективных электродов значительно выше, чем стеклянных, однако их точность существенно ниже и зависит от контролируемой среды.

### 2.7.2. Кондуктометрический метод

О значении кислотности и щелочности растворов (особенно - гомогенных, не содержащих других компонентов) можно судить, измеряя их электропроводность, которая в значительной мере зависит от концентрации ионов в жидкости. Схема кондуктометра изображена на рисунке 2.33.

Нижняя часть стеклянного электрода изготавливается из специального электродного стекла. Толщина стенки шарика составляет сотые доли мм, что вызвано необходимостью понизить сопротивление электрода до 100-200 МОм. Входное сопротивление прибора, измеряющего ЭДС в этом случае, может быть не более  $10^{10}$  Ом, что значительно облегчает условия измерения.

На рисунке 2.32 приведена зависимость значения ЭДС от рН.

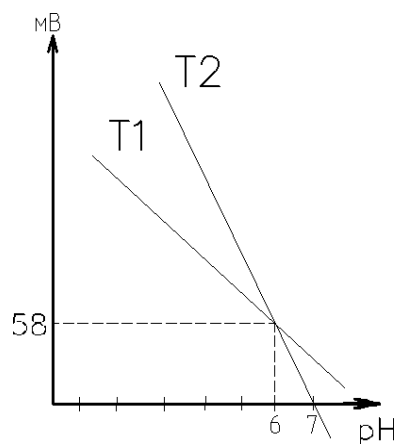


Рис. 2.32. Зависимость ЭДС от рН (T1 < T2)

Как видно на рисунке 2.32, при нулевой температуре изменение ЭДС составляет 58 мВ/рН. При более высокой температуре чувствительность прибора возрастает, т.е. становится более 58 мВ/рН.

Приборы, предназначенные для измерения величины рН, называются рН-метрами.

У серийно выпускаемых рН-метров имеется дополнительное устройство (термометр сопротивления), предназначенное для компенсации погрешности, связанной с из-

**Случайная** погрешность измерения изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Причины появления систематической погрешности разные: несовершенство СИ (основная погрешность), отклонение условий измерения от нормальных, методическая погрешность, обусловленная косвенностью метода измерения. В ряде случаев значение систематической погрешности можно определить и при этом ввести соответствующую поправку. Например, значение систематической погрешности можно установить путем измерения контролируемого параметра более точным прибором, а также расчетным путем, когда известны параметры факторов, вызывающих дополнительные погрешности. Этот вид систематических погрешностей относится к исключенным систематическим погрешностям. Когда значение систематической погрешности для данного СИ при конкретном измерении неизвестно, но **максимальные** значения ее составляющих записаны в паспорте на СИ (основная, дополнительная, динамическая и методическая составляющие), то эти погрешности именуются неисключенными систематическими погрешностями, и они проявляются в конкретных условиях как случайные погрешности.

## Глава 1.2. Определение числа измерений

Значение суммарной погрешности измерения можно уменьшить путем проведения ряда повторных измерений. Это эффективно в том случае, если случайная составляющая погрешности соизмерима с систематической составляющей или больше ее. Если же систематическая составляющая погрешности существенно больше случайной составляющей, то повторные измерения не эффективны.

Необходимое число повторных измерений определяется заданной достоверностью измерения и соотношением между систематической и случайной составляющими погрешности.

Расчет числа измерений  $n$  делается исходя из условия, что доверительный интервал для случайной составляющей погрешности составляет 10-50% от допуска  $\delta$  на отклонение параметра (или от известной величины значения систематической погрешности СИ).

Доверительный интервал  $\Delta X$  – это зона отклонения параметра от истинного значения, внутри которой будет находиться результат измерений с заданной доверительной вероятностью  $\alpha$ .

Расчет ведется в следующей последовательности:

1. Находим значение:

$$\Delta X = (0,1-0,5) \delta \quad (1.1)$$

2. Находим вспомогательную величину  $q$ , определяющую соотношение между систематической и случайной составляющими погрешности:

$$q = \frac{\Delta X}{S(x)}, \quad (1.2)$$

где  $S(x)$  – известное значение среднего квадратического отклонения данного метода измерений. Если  $S(x)$  неизвестно, то оно определяется по 5-7 пробным измерениям.

3. По таблице 1.1. находим необходимое число измерений для заданной вероятности  $\alpha$ . При проведении технических измерений значение  $\alpha$  обычно принимается равным 0,95, а при более точных аналитических измерениях – 0,99.

Таблица 1.1.

Определение числа измерений  $n$

Для нейтральных растворов (дистиллированная вода)  $C_{\text{H}} = 10^{-7}$ , что соответствует значению 7 рН; для кислых растворов концентрация водородных ионов составляет

$C_{\text{H}} = 10^0 - 10^{-7}$ , что соответствует значениям (от -1 до 7) рН, для щелочных растворов значение рН изменяется в пределах (7-14) рН.

Для измерения ЭДС в раствор погружаются два электрода: измерительный и сравнительный. В качестве измерительных электродов применяются стеклянные, сурьмяные и ионоселективные электроды. В качестве сравнительных электродов применяются каломельные (на основе каломеля –  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) или хлорсеребряные электроды (на основе  $\text{AgCl}$ ).

Устройство электродов изображено на рисунке 2.31.

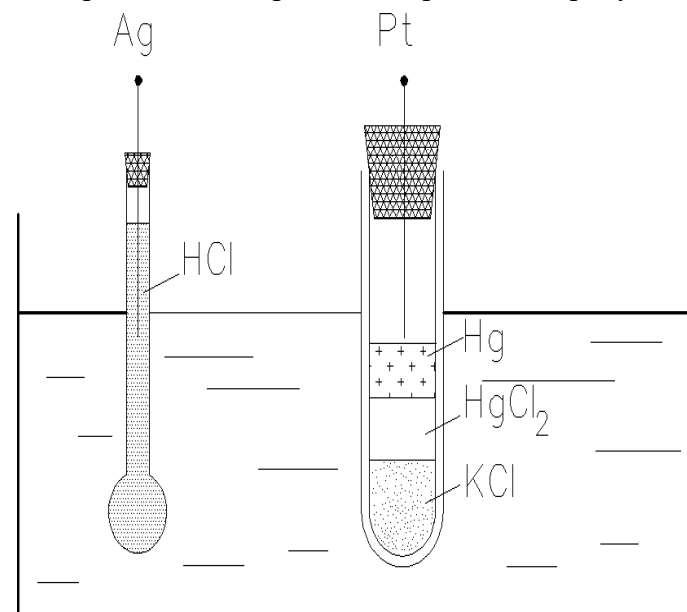


Рис. 2.31. Устройство стеклянного и каломельного электродов для измерения кислотности

С одной стороны сосуда 1 крепится контейнер 2 с источником излучения. В качестве источника обычно используется изотоп  $^{60}\text{Co}$  активностью 10-20 миллиКюри. Пройдя через сосуд 1, ослабленный пучок поступает на сцинтилляционный детектор, состоящий из сцинтиллятора (кристалл NaI) 4, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 5 и измерительного прибора 3. Гамма-кванты, взаимодействуя с кристаллом, создают световые вспышки в нем, число которых пропорционально интенсивности излучения. Для повышения эффективности счета и точности измерения число вспышек кристалла многократно увеличивается с помощью ФЭУ и затем суммируется и регистрируется измерительным прибором.

Погрешность радиометрического плотномера составляет 2-5%.

## Глава 2.7. Измерение кислотности и щелочности

Для контроля кислотности и щелочности в производственных условиях нашли применение потенциометрический и кондуктометрический методы.

### 2.7.1. Потенциометрический метод

Этот метод основан на образовании на специальных электродах, погруженных в раствор, электродвижущей силы, значение которой зависит от концентрации водородных ионов, определяющей степень кислотности или щелочности раствора.

Кислотность и щелочность раствора измеряется в

единицах рН, при этом  $\text{pH} = -\lg C_{\text{H}}$ , где  $C_{\text{H}}$  - концентрация ионов водорода.

$q$ $\alpha$	10	5	2	1	0,5	0,2
0,95	2	3	4	7	18	99
0,99	3	4	6	11	31	171

## Глава 1.3. Определение суммарной погрешности измерения

Определение суммарной погрешности измерений предлагается выполнять или в соответствии с ГОСТ 8.207-76 или, приближенно, по методике А.М. Дальского.

Вначале рассмотрим порядок вычислений по стандартной методике.

1. Определяем и исключаем, по возможности, систематические составляющие погрешности (путем измерения стандартного образца, применения более точного СИ или расчетным путем).

2. Определяем суммарную составляющую не исключенной систематической погрешности  $q$

$$q = 1.1 \sqrt{\sum_{i=1}^m q_i^2} \quad (1.3)$$

Это выражение соответствует случаю, когда составляющие не исключенной систематической погрешности распределены по равномерному закону, что наиболее вероятно, а доверительная вероятность принята 0,95.

3. Определяем значение случайной составляющей погрешности по результатам  $n$  измерений  $x_i$  в следующей последовательности:

а) Находим среднее арифметическое значение  $\bar{A}$  результата измерений:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.4)$$

б) Находим среднее квадратическое отклонение  $S(x)$  для единичного измерения:

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{A})^2}{n}} \quad (1.5)$$

в) Находим среднее квадратическое отклонение результата

измерения (отклонение от  $\bar{A}$ ):

$$S(\bar{A}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}} \quad (1.6)$$

г) Определяем доверительную границу для случайной составляющей погрешности:

$$e = t_{\alpha, n} S(\bar{A}), \quad (1.7)$$

где коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n}$  в зависимости от числа измерений  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$  находим из таблицы 1.2.

Таблица 1.2.

Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n}$

$n \backslash a$	4	5	6	8	10	13	15	20	30
0,95	3,18	2,78	2,57	2,36	2,26	2,18	2,15	2,09	2,04
0,99	5,84	4,6	4,03	3,5	3,25	3,1	2,98	2,86	2,76

д) Проверяем гипотезу о нормальном распределении случайных величин, используя критерии Пирсона, Колмогорова или другие.

4. Определяем значение суммарной погрешности  $\Delta$ , для этого:

а) находим значение параметра  $m$  по формуле:

Погрешность измерения плотности пневмометрическим методом оценивается в 2%. Основные составляющие погрешности - неточность (невертикальность) установки датчика и изменение температуры измеряемой среды.

### 2.6.2. Радиометрический плотномер

Радиометрические плотномеры применяются для измерения плотности среды в закрытых сосудах. Их принцип действия заключается в регистрации интенсивности пучка

гамма-квантов, прошедшего через контролируемую среду. Поскольку поглощение гамма-квантов средой увеличивается с повышением плотности вещества, то интенсивность прошедшего излучения будет уменьшаться при увеличении плотности.

Принципиальная схема измерения плотности изображена на рисунке 2.30.

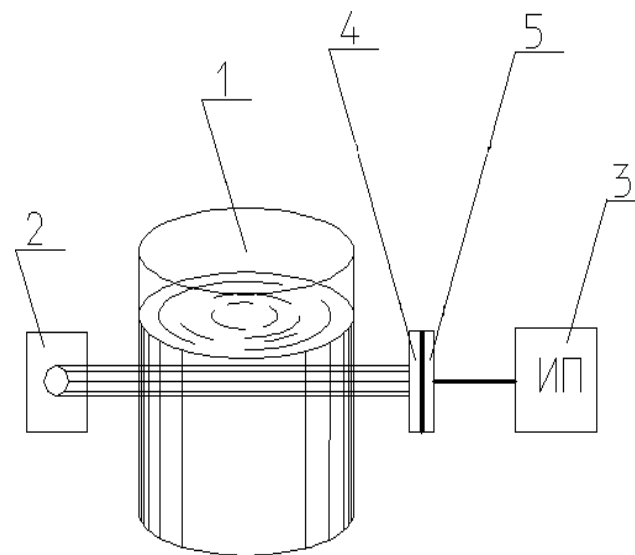


Рис. 2.30. Принципиальная схема радиометрического плотномера

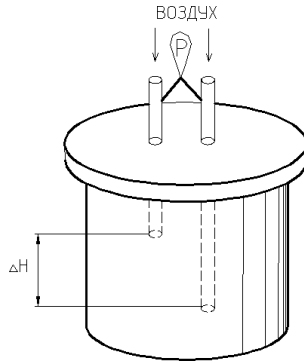


Рис. 2.29. Схема пневмометрического плотномера.

Датчик представляет собой две трубы разной длины из нержавеющей стали, приваренные к фланцу и погруженные в контролируемую жидкость. В трубы подается сжатый воздух давлением 0,5-1 МПа, за счет чего в них создается давление, равное давлению столба жидкости в месте максимального погружения трубы.

Давление в левой трубе  $P_1 = g H_1$ , давление в правой трубе  $P_2 = g H_2$ . Разница давления в трубах

$$P_1 - P_2 = g (H_1 - H_2) = g \Delta H \quad (2.6)$$

Величина  $\Delta H$  называется базой датчика, ее значение постоянно, а выбор его зависит от диапазона измерения примененного дифманометра или же, если имеется возможность выбора дифманометра, значение базы принимается 100-300 мм в зависимости от контролируемой плотности.

Таким образом, разница давлений, измеряемая дифманометром, пропорциональна значению измеряемой плотности.

В качестве дифманометра в настоящее время обычно используется Сапфир-22ДД, имеющий стандартизованный выход, позволяющий применять в качестве вторичных приборов стрелочные приборы М-1730, цифровые приборы

$$m = \frac{q}{S(A)} \quad (1.8)$$

При этом могут возникнуть три варианта:

1).  $m \leq 0,8$ . В этом случае за суммарную погрешность принимается случайная составляющая погрешности  $e$ .

2).  $m \geq 8$ . В этом случае за суммарную погрешность принимается систематическая составляющая погрешности  $q$ .

3). Значение  $m$  находится в диапазоне между 0,8 и 8. В этом случае суммарная погрешность определяется по формуле:

$$\Delta = k S_{\Sigma}, \quad (1.9)$$

где  $k = \frac{q + e}{\sqrt{\sum_{j=1}^m S_j^2}}$ , (1.10)

а  $S_{\Sigma} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2} = \sqrt{A^2 + \sum_{j=1}^m q_j^2}$ . (1.11)

Значение суммарной погрешности можно также определить приближенно (с погрешностью 5-20%) по формуле, рекомендованной А.М. Дальским:

$$D = p \sqrt{\frac{h \Delta^2}{\lambda^2} + \lambda^2} \quad (1.12)$$

типа ТЦМ или регулирующие приборы типа ИРТ.

где  $p$  – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности: при вероятности  $\alpha = 0,67$   $p = 1$ , при  $\alpha = 0,95$   $p = 2$ , при  $\alpha = 0,99$   $p = 3$ ;  $l_1, l_2, l_3$  - коэффициенты, зависящие от закона распределения случайных величин: для нормально-

го закона  $l_1 = \frac{1}{9}$ ; для равномерного закона, а также неизвестного закона распределения случайной величины  $l_2 = \frac{1}{3}$ ; для закона Симпсона  $l = \frac{1}{3}$   $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  – значения доверительных границ погрешностей для разных законов распределения.

На противоположных сторонах аппарата устанавливаются две колонки (1) в которых смонтированы ходовые винты с перемещающимися по ним каретками. На одной из кареток (2) установлен защитный свинцовый контейнер с радиоактивным источником излучения. Через узкую щель в контейнере (коллиматор) пучок излучения проходит

сквозь аппарат и попадает на детектор ионизиционного излучения (3), расположенный в каретке на противоположной стороне. Каретки синхронно поступательно перемещаются вдоль аппарата за счет вращения ходовых винтов от электродвигателей и редукторов (4) и обеспечивают автоматическое слежение за уровнем. В положении измерения середины кареток совпадают с уровнем жидкости. Если же уровень жидкости понизится, то большая часть излучения будет проходить через газ, который значительно хуже поглощает излучение, ввиду чего детектор регистрирует повышение излучения. Сигнал от детектора поступит на схему автоматического слежения, и обе каретки станут одновременно перемещаться вниз до тех пор, пока они не достигнут нового положения уровня жидкости. Это положение фиксируется датчиком линейных перемещений.

В промышленности нашли применение радиоактивные уровнемеры типа УР-4, имеющие основную погрешность 20 мм. В качестве источника излучения в этих приборах применен изотоп Со-60 с активностью порядка 10 миллиКюри. В качестве датчика ионизиционного излучения используется счетчик Гейгера-Мюллера.

## Глава 2.6. Измерение плотности жидкости

### 2.6.1. Пневмометрический плотномер

Пневмометрический плотномер (рисунок 2.29) состоит из смонтированного на крышке емкости датчика дифференциального манометра и вторичного прибора.

нулю. Следовательно, при данной схеме включения положения роторов первого и второго сельсинов будут идентичны. Измеряя угол поворота ротора второго сельсина, можно судить о значении уровня.

Серийно выпускаемые сельсинные уровнемеры состоят из двух блоков: датчика сельсинного уровнемера ДСУ и уровнемера сельсинного показывающего УСП. Точность измерения уровня этими приборами оценивается в 1%. С целью уменьшения погрешности измерения для случая, когда жидкость в емкости интенсивно перемешивается, поплавков помещают в защитную трубу.

### 2.5.3. Радиоактивные уровнемеры

Радиоактивные уровнемеры нашли применение при измерении уровня жидкости или расплавленного металла в закрытом аппарате. Работа этих приборов основана на регистрации прошедшего через аппарат радиоактивного излучения. При этом используется зависимость поглощения излучения от вида поглощающих веществ.

На рисунке 2.28 показана принципиальная схема измерения уровня.

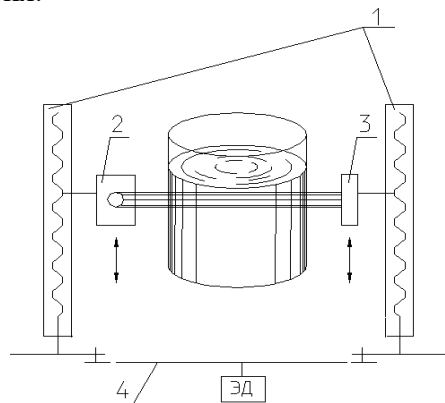


Рис. 2.28. Принципиальная схема радиационного уровнемера

## Часть 2. Технические средства и методы измерений

### Глава 2.1. Измерение геометрических размеров

Область измерения геометрических размеров охватывает измерение длин и углов, отклонений размеров, формы и расположения поверхностей, параметров конусов, резьб и зубчатых колес. В данной главе будут рассмотрены средства измерений длин, отклонений и перемещений. Особое внимание будет уделено СИ, используемым в автоматизированном оборудовании.

Диапазон измерения линейных размеров охватывает значения от долей микрометра до нескольких метров. При проведении этих измерений на результат измерения существенно влияют внешние условия, действие которых особо заметно при точных измерениях.

Государственным стандартом установлены следующие требования к условиям производства линейных измерений (нормальные условия):

- температура окружающей среды 20 °С ;
- атмосферное давление 101324,72 Па (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающего воздуха 58 %;
- ускорение свободного падения 9,8 м/с<sup>2</sup>;
- направление линии измерения линейных размеров до 160 мм наружных размеров- вертикальное, в остальных случаях - горизонтальное.

Пределы допускаемых отклонений от нормальных условий измерения указаны в стандартах для различных средств измерений. С целью обеспечения требуемой точности измерений рекомендуется измеряемые изделия выдерживать при нормальной температуре не менее 2 часов (для массивных деталей - до 36 часов); при этом средства измерений должны находиться в стандартных условиях не менее 24 часов до начала измерения.

Значение температурной погрешности измерения зависит от материала, размера контролируемой детали и ее температуры. Так, например, если стальная деталь диаметром 50 мм нагрета в процессе обработки до  $50^{\circ}C$ , то ее размер будет увеличен по сравнению с размером при нормальных условиях на 40 мкм, т.е. погрешность измерения вдвое превышает поле допуска для 10 качества точности (20 мкм).

При применении контактных средств измерений необходимо учитывать погрешность, обусловленную упругой деформацией материала детали. Обычно измерительные усилия СИ составляют 0,03-1,5 Н. При контроле стальных деталей с измерительным усилием 1Н погрешность измерения может составить 2-3 мкм.

2.1.1. В зависимости от физического принципа измерения СИ линейных размеров бывают: механические, пневматические, пневмоэлектрические, оптические и индуктивные.

В таблице 2.1. приведены характеристики механических средств измерения линейных размеров.

Таблица 2.1.

Характеристики СИ линейных размеров

Наименование СИ	Тип СИ	Пределы измерения, мм	Цена деления, мм	Погрешн. измерения, мкм	Примеч
Штангенциркуль	ШЦ-1	0-125	0,1		
Штангенциркуль	ШЦ-II	0-320	0,05		
Штангенциркуль	ШЦ-III	1500-4000	0,1		
Штангенглубиномер	ШГ	0-500	0,1 0,05		
Штангенрейсмасс	ШР	0-250	0,05		
Штангенрейсмасс	ШР	1500-2500	0,1		
Микрометр	МК	0-25	0.01	$\pm 4$	$\pm 2$ для класса 0

## 2.5.2. Сельсинный уровнемер

Сельсинный уровнемер представляет собой два заторможенных двигателя - сельсина. На обмотки статоров сельсинов подается переменное напряжение; обмотки роторов, соединенные в звезду, связаны тремя проводниками. Первый сельсин располагается на крышке емкости, в которой необходимо измерять уровень. На оси его ротора расположен шкив, на который намотан тонкий трос. Один конец троса соединен с поплавком, находящимся в емкости, ко второму концу троса прикреплен груз (рис. 2.27). Таким образом, угол поворота ротора первого сельсина будет пропорционален перемещению поплавка в емкости, то есть уровню.

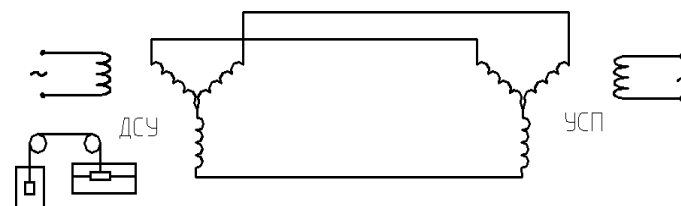


Рис. 2.27. Схема сельсинного уровнемера

Когда обмотки первого и второго роторов расположены симметрично, ток в проводниках, соединяющих роторы, не протекает. При изменении уровня ротор первого сельсина поворачивается, что приводит к рассогласованию схемы, в результате которого по соединительным проводникам и в обмотках второго ротора потечет ток рассогласования. Электромагнитные поля, создаваемые обмотками второго ротора, будут взаимодействовать с электромагнитным полем статора таким образом, что возникший при этом вращающий момент будет вращать ротор второго сельсина в том же направлении, в котором повернулся ротор первого сельсина. Это вращение будет продолжаться до тех пор, пока роторы не займут симметричного положения, при котором токи в обмотках роторов станут равными

массового расхода газообразного UF<sub>6</sub> внутри трубы, являющегося в данном случае охладителем.

Электронный блок управления, измеряя термо-ЭДС термопары, обеспечивает регулирование постоянного значения температуры путем соответствующего изменения силы тока в нагревающей катушке. Значение силы тока, пропорциональное массовому расходу гексафторида урана, преобразуется в стандартный сигнал 0 -5 мА, измеряемый прибором и используемый в схеме автоматического управления для поддержания заданного значения расхода.

Тепловой расходомер типа ТИР разработан и выпущен малой серией на Элктростальском ОАО “Машиностроительный завод”. Он рассчитан на измерение расхода UF<sub>6</sub> в диапазоне 0 - 100 кг/час с основной погрешностью 5%.

## Глава 2.5. Измерение уровня жидкости

### 2.5.1. Пневмометрический уровнемер

Устройство и принцип действия пневмометрического уровнемера были рассмотрены в предыдущей главе при описании расходомера истечения. Здесь следует отметить то обстоятельство, что показания уровнемера напрямую зависят от плотности жидкости  $g$ , так как эти параметры связаны зависимостью  $P = g H$ .

Поскольку давление измеряется прибором достаточно точным, например прибором Сапфир 22ДИ, имеющим погрешность 0,25-1%, то основной вклад в суммарную погрешность будет внесен изменениями плотности жидкости. В принципе, эта методическая погрешность может быть учтена и исключена путем периодического измерения плотности методом взвешивания. Разумеется, при первоначальной градуировке прибора значение плотности должно быть учтено.

### Продолжение таблицы 2.1.

Наименование СИ	Тип СИ	Пределы измерения, мм	Цена деления, мм	Погрешн. измерения, мкм	Примеч
Микрометр	МК	500-600	0,01	±10	
Микрометр листовый	МЛ	0-5 0-25	0,01 0,01	±4 ±4	
Микрометр трубный	МТ	0-25	0,01	±4	д <sub>ншт</sub> 12мм
Микрометр-нутромер	МН	50-75	0,01	±6	
Индикатор часового типа	ИЧ-2	0-2	0,01	4 – класс 0, 6 – класс 1	Измерит. усилие 1,5 Н
Индикатор часового типа	ИЧ-10	0-10	0,01	8 – класс 0, 10 – класс 1	
Индикатор рычажно-зубчатый	МИГ	0-1 0-2	0,001 0,002	3 6	
Индикатор рычажно-зубчатый	ЛИГ	± 0,05	0,001	0,7	
Индикатор пружинный (микрокастор)	01ИГП	0,004	0,0001	0,1	
Микатор	02ИПМ	± 0,01		0,2	
Миникатор	10301	±0,08		02	
Электроконтактный двухпредельный	Мод. 233	0-0,4	0,001	0,5	Точность срабатывания
Электроконтактный двухпредельный	КДМ13	0-3	0,005	1	То же
Электроконтактный трехпредельный	Мод. 229	0-1	0,002	1	То же

2.1.2. Широкое применение в автоматических системах контроля линейных размеров нашли индуктивные датчики, в частности, индуктивные преобразователи: типа АК-3М с пределами измерения 10-120 мм и ценой деления 10 мкм, и типа Мод. 213 с пределами измерения 0-5 мкм и ценой деления 0,02 мкм. Эти преобразователи имеют выход на самописец и электроконтактную сигнализацию.

2.1.3. Как отмечалось ранее, при применении контактных методов измерения линейных размеров возникает погрешность от измерительного усилия, связанная с упругими деформациями детали. Поэтому при проведении точных измерений нашли применение пневматические и оптические преобразователи. Схема пневматического преобразователя приведена на рисунке 2.1.

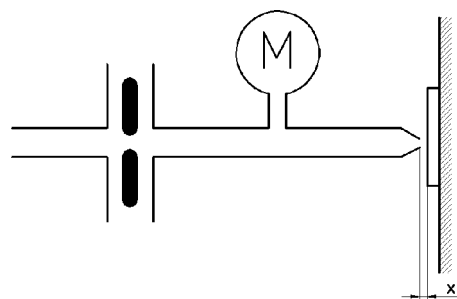


Рис. 2.1. Схема пневматического преобразователя

Преобразователь представляет собой сопло с небольшим отверстием на конце. Диаметр отверстия примерно равен значению измеряемой величины  $x$ . В сопло подается сжатый воздух через диафрагму, диаметр которой несколько меньше диаметра выходного отверстия сопла. При приближении сопла к детали увеличивается сопротивление выходу воздуха, и давление внутри сопла повышается. Таким образом, измеряя давление воздуха в сопле, можно определить расстояние от сопла до детали, которое будет зависеть от значения  $x$ .

$$P = f(x).$$

Промышленностью выпускается несколько типов приборов с пневматическими преобразователями, в частности прибор активного контроля БВ-6060. Пределы измерения этих приборов 2,5-200 мкм, цена деления может быть 0,5...1...2 мкм.

зироваться строго определенные массовые количества нескольких реагентов, в частности при газопламенном восстановлении гексафторида урана в аппаратах «Сатурн». Гексафторид урана ( $UF_6$ ) является промежуточным продуктом при получении диоксида урана ( $UO_2$ ) - ядерного топлива для АЭС. При низкой температуре  $UF_6$  находится в твердой фазе, при комнатной - в жидкой, а при нагревании свыше  $20\text{ }^\circ\text{C}$  в газообразной фазе с переменной плотностью.

Гексафторид урана поступает в технологические аппараты из баллонов, нагреваемых по программе с  $20$  до  $105\text{ }^\circ\text{C}$ , и его массовый расход измеряется с помощью теплового расходомера. Кроме того, в аппарат в дозированных количествах в соответствии со стехиометрическим составом подаются водород, пар и воздух.

Датчик теплового расходомера изготовлен в виде тонкостенного никелевого патрубка с фланцами (рисунок 2.26).

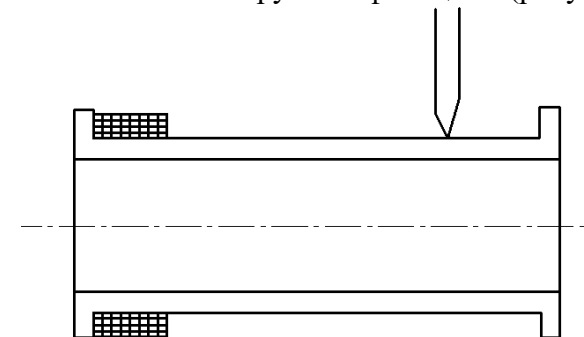


Рис. 2.26. Датчик теплового расходомера

С одной стороны на патрубке расположена катушка, подключенная к высокочастотному генератору. С другой стороны с наружной поверхностью патрубка соприкасается миниатюрная контактная термопара. Тепло, образуемое высокочастотным генератором, передается по трубке к термопаре, температура нагрева которой будет зависеть от

Уровень  $H$  измеряется пневмометрическим методом. В левый отсек погружается трубка, в которую подается сжатый воздух. Давление воздуха в трубке будет точно соответствовать давлению столба жидкости на глубине  $H$ . Таким образом, измеряя давление сжатого воздуха в трубке, можно определить уровень  $H$ , соответствующий измеряемой скорости. Для измерения давления используются манометры “Сапфир-22ДИ” или “Метран” с цифровыми измерительными приборами.

Поскольку зависимость скорости потока жидкости (а следовательно, и расхода) от уровня носит квадратичный характер, шкала прибора нелинейна. Для линеаризации шкалы расходомера можно поступить двояко:

- изготовить отверстие в перегородке в виде фигурной щели, конфигурация которой рассчитывается таким образом, чтобы уровень жидкости был прямо пропорционален расходу;

- применить стандартные схемные линеаризаторы.

Технические характеристики расходомера “Жиклер”: диапазон измерения 0-500 л.; основная погрешность 4%.

#### 2.4.8. Тепловой расходомер

Рассмотренные выше расходомеры применяются для измерения объемного расхода. В случаях, когда требуется определять значение массового расхода, автоматический пересчет объема в массу возможен только при известном значении плотности среды. Если же плотность контролируемой среды существенно изменяется в ходе технологического процесса, например при значительном изменении температуры, то пересчет объема в массу будет сопровождаться большой погрешностью. Задача определения массового расхода крайне актуальна, например, когда для получения химически чистых соединений в реактор должны до-

Недостатком пневматических преобразователей является большая инерционность, обусловленная временем установления давления в сопле. Постоянная времени прибора достигает 1 сек.

Чепецким механическим заводом (г. Глазов) совместно с Казанским авиационным институтом разработаны и серийно выпускаются пневмоэлектрические преобразователи, которые нашли широкое применение для измерения отклонений линейных размеров, наружного и внутреннего диаметра труб. Постоянная времени этих приборов составляет 0,05 сек., а погрешность измерения не превышает 5 мкм при пределах измерения 100 мкм.

На рисунке 2.2 изображена схема пневмоэлектрического преобразователя ПЭИР-6, предназначенного для измерения внутреннего диаметра труб.

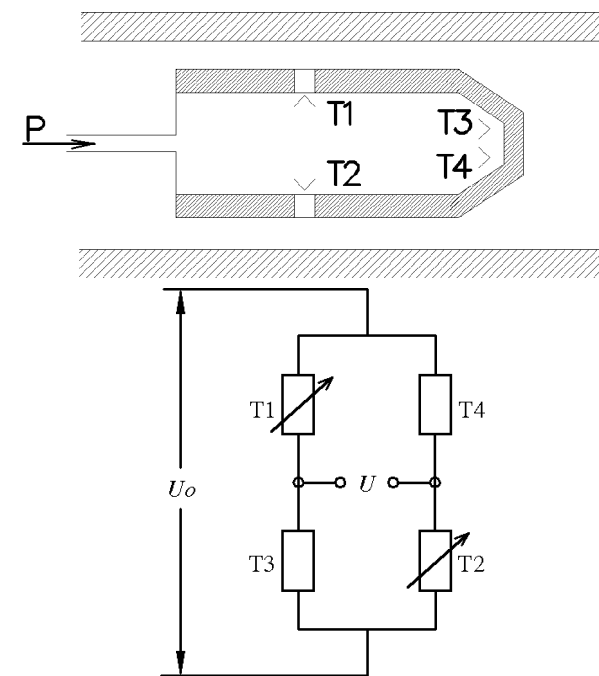


Рис. 2.2. Схема пневмоэлектрического преобразователя ПЭИР-6

В сопло, имеющее два диаметрально расположенные отверстия, по гибкому шлангу через дроссель поступает сжатый воздух. Возле выходных отверстий установлены два бусиновых терморезистора (измерительные терморезисторы), которые обдуваются потоками воздуха. Еще два терморезистора (компенсационные терморезисторы) установлены в глубине сопла. Терморезисторы включены в мостовую схему таким образом, что измерительные и компенсационные элементы находятся в противоположных плечах моста. На одну диагональ моста подается напряжение, и ток, протекающий по терморезисторам, нагревает их до  $200^{\circ}\text{C}$ . При уменьшении внутреннего диаметра трубы, в которую вводится сопло, скорость истечения воздуха из отверстий уменьшается, вследствие чего температура измерительных терморезисторов увеличится, что приведет к изменению напряжения во второй диагонали моста. Таким образом, напряжение в диагонали моста будет пропорционально скорости истечения воздуха из отверстий, т.е. пропорционально внутреннему диаметру трубы.

$$U = f(D).$$

2.1.4. Из оптических средств измерений линейных размеров будут рассмотрены приборы с датчиками - фотодиодными матрицами (линейками), матрицами (линейками) ПЗС (приборы зарядной связи) и лазерные приборы. (Линейка от матрицы отличается тем, что в ней светочувствительные ячейки располагаются в линию, а в матрице точечные ячейки образуют несколько сотен точечных рядов).

На рисунке 2.3 приведена схема измерения диаметра изделия с помощью фотодиодной линейки.

Свет от светодиода СД падает на линзу Л и затем параллельным пучком попадает на фотодиодную линейку ФДЛ.

## 2.4.7. Щелевой расходомер (расходомер истечения)

Щелевой расходомер является самым простым по конструкции прибором и может быть изготовлен практически на любом предприятии. Серийно он выпускается под названием “Жиклер” Челябинским заводом “Прибор”. Помимо простоты достоинством этого типа расходомеров является возможность измерения загрязненных и неэлектропроводных жидкостей.

На рисунке 2.25. изображена конструкция щелевого расходомера.

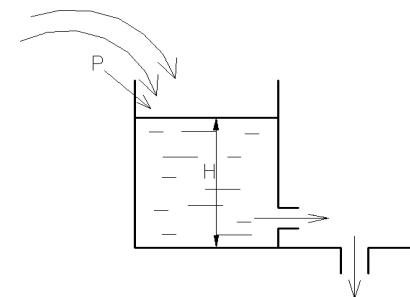


Рис. 2.25. Щелевой расходомер

Ящик из нержавеющей стали разделен перегородкой, в нижней части которой имеется калиброванное отверстие. Жидкость подается в левую часть ящика и через отверстие перетекает в правую часть и сливается в технологический аппарат. При изменении расхода жидкости ее уровень в левой части будет также изменяться. Зависимость скорости потока  $V$  от уровня выражается формулой:

$$V = k \sqrt{2gH} \quad (2.5)$$

где  $k$  - коэффициент расхода, зависящий от диаметра отверстия и свойств жидкости;  
 $g$  - ускорение силы тяжести;  $H$  - высота уровня жидкости в левом отсеке.

В металлическом корпусе - патрубке с внутренним диаметром, равным диаметру трубы, размещается модулятор в виде конуса, укрепленного на пластине или в виде пластины, прикрепленной одним концом к патрубку. В корпусе смонтированы две пары искателей (измерительная и компенсационная). На излучающие датчики подается непрерывное синусоидальное напряжение, которое образует в жидкости ультразвуковые колебания с соответствующей частотой ультразвука. Приемные датчики преобразуют ультразвуковые колебания в электрические колебания соответствующей частоты. Протекающая жидкость, обтекая модулятор, создает завихрения, модулирующие основную гармонику ультразвуковых колебаний. Частота модуляции пропорциональна скорости потока. Электрические сигналы, снимаемые с приемных датчиков, демодулируются, а затем, путем измерения частоты модуляции и измерения соотношения двух сигналов, сначала преобразуются в цифровой сигнал, а затем в стандартизованный аналоговый сигнал, пропорциональный значению расхода.

Вихревые расходомеры имеют достоинство: устойчивая работа в условиях вибрации труб, изменения давления, температуры и химсостава среды. Недостатком вихревого расходомера является невозможность работы на загрязненных средах.

В числе выпускаемых вихревых расходомеров можно назвать:

- Счетчик ДРВ в нержавеющей стали на расходы от 50 до 800 м<sup>3</sup>/час, с внутренними диаметрами 50-200 мм и основной погрешностью 0,5%. Изготовитель - НИИТеплоприбор, Москва.

- Расходомер Метран-400 на расходы от 0,18 до 700 м<sup>3</sup>/сек, с основной погрешностью 0,65%. Изготовитель - приборостроительный завод "Прибор", Челябинск.

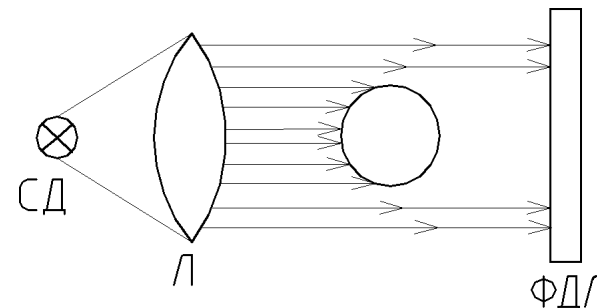


Рис. 2.3. Схема измерения диаметра с помощью фотодиодной линейки

Линейка состоит из основы, на которую нанесены светочувствительные фотодиодные ячейки. Если поместить деталь на пути светового потока, то на фотодиодной ячейке образуется тень от светового потока, и ячейки, оказавшиеся в тени, будут иметь более низкую проводимость, чем ячейки, на которые попадает свет. Электронная схема импульсного адресного опроса обеспечивает подсчет числа ячеек, оказавшихся в тени. Произведение этого числа на шаг расположения ячеек соответствует размеру тени, следовательно - диаметру контролируемой детали. Разрешающая способность такой линейки равна шагу расположения ячеек. Для линейки ЛФ-16 это соответствует 20 мкм. Японские фотодиодные линейки имеют разрешающую способность 16 мкм.

Матрицы и линейки ПЗС (рисунок 2.4.) представляют собой кремниевую подложку, на которой нанесены точки или линии из окиси кремния, именуемые затворами. Под действием света под затвором образуется дырочный заряд (дефект электронов), который фиксируется электронной схемой. За счет подачи управляющего импульса комбинация дырок и зарядов перемещается в выходной регистр, где суммарное число импульсов от всех затененных ячеек преобразуется в значение контролируемой величины. ПЗС-линейки изготавливаются с шагом расположения яче-

ек 8-12 мкм. Это обеспечивает контроль геометрических размеров изделий с точностью 8-12 мкм.

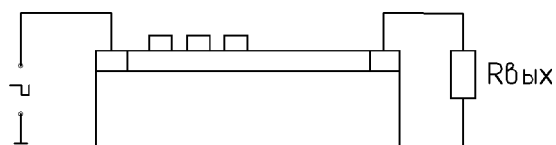


Рис. 2.4. Схема матрицы ПЗС

Достоинством фотодиодных и ПЗС-линеек является то, что при контроле размеров не требуется точная базировка детали, что обязательно при использовании контактных средств контроля.

## Глава 2.2. Измерение температуры

### 2.2.1. Манометрические термометры

Манометрические термометры (рис. 2.5) состоят из термобаллона (1), капилляра (2) и упругого чувствительного элемента (3).

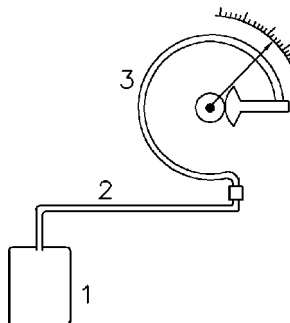


Рис. 2.5. Устройство манометрического термометра

В зависимости от наполнителя, манометрические термометры разделяются на жидкостные (наполнитель - ртуть, толуол, ксилол), конденсационные (наполнитель - легкокипящие жидкости - пропан, эфир, этиловый спирт) и газовые

“Метран” УФМ, с диапазонами измерений от 8 до 1400 м<sup>3</sup> / час. Внутренний диаметр корпуса датчика от 15 до 200 мм. Основная погрешность прибора 1-3%. Приборы имеют нормализованный выход 0-5 мА.

Необходимо отметить, что ультразвуковые расходомеры должны индивидуально градуироваться для каждой технологической среды на специальных, аттестованных установках. Если градуировка прибора проводится на воде, а его использование предполагается на среде с отличными характеристиками по температуре и скорости распространения ультразвука, то допустимо, точно зная параметры измеряемой среды, по согласованию с метрологической службой предприятия, применять расчетную градуировочную характеристику прибора.

### 2.4.6. Вихревой ультразвуковой расходомер

В последние годы предприятия наладили выпуск новой разновидности ультразвукового расходомера - вихревого расходомера. Принцип действия этого прибора можно понять из принципиальной схемы, изображенной на рисунке 2.24.

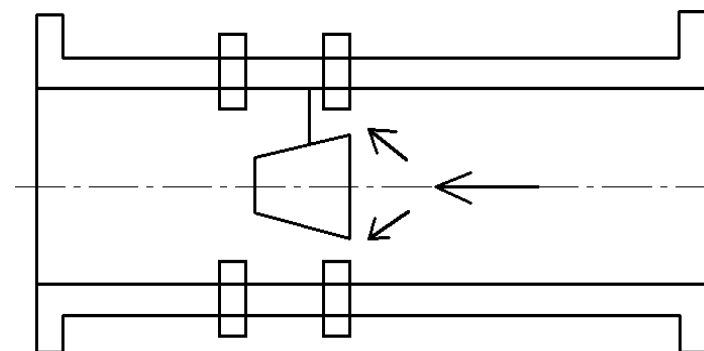


Рис. 2.24. Схема вихревого ультразвукового расходомера

электрический импульс. Время прохождения ультразвукового сигнала пути между электродами при отсутствии потока жидкости ( $V=0$ ) будет определяться как отношение расстояния между искателями  $L$  к скорости распространения ультразвука  $C$ .

$$T_1 = \frac{L}{C} \quad (2.4)$$

Когда жидкость будет протекать внутри патрубка слева направо со скоростью  $V > 0$ , ультразвуковой импульс, проходящий в потоке, будет смещаться потоком таким образом, что путь  $L$ , проделанный импульсом между левой парой электродов будет несколько увеличен, а между правой парой электродов - соответственно уменьшен. Значения уменьшения и увеличения пройденного ультразвуком пути пропорциональны скорости потока  $V$ . Значения изменений пути можно определить по значениям изменения времени прохождения ультразвука.

Современные электронные системы обработки сигналов позволяют измерять интервалы времени с точностью до десятых долей процента, что позволяет определять скорость потока с достаточно высокой точностью.

Ранее отмечалось, что на скорость ультразвука в среде влияет ее температура. С целью уменьшения температурной погрешности в приборе используется двухканальная схема измерения с применением двух пар искателей. При увеличении температуры среды временные сигналы первого и второго канала увеличиваются, а разница сигналов при этом практически не изменяется.

Промышленностью серийно выпускаются ультразвуковые расходомеры нескольких типов, например:

УЗР-Р-04, с диапазонами измерений от 0,1 до 10 м<sup>3</sup>/час, с основной погрешностью измерения 1-3%. Приборы имеют нормализованный выход 0-5 мА.

(наполнитель - азот, гелий). В качестве упругого чувствительного элемента используются манометрические пружины, в том числе многовитковые, а также сильфоны и мембраны.

Принцип действия манометрических термометров заключается в том, что при нагревании термобаллона, помещенного в контролируемую среду, повышается давление находящегося внутри баллона наполнителя, которое по капилляру (медная трубочка диаметром 2 мм) передается в манометрический чувствительный элемент и фиксируется показывающим или записывающим устройством.

Длина капилляра составляет: для газовых термометров - до 60 метров, для конденсационных - до 25 метров и для жидкостных - до 10 метров.

При монтаже капилляры укладываются в защитные трубы или кожухи. Необходимо иметь в виду, что при монтаже жидкостных манометрических термометров термобаллон и чувствительный элемент должны располагаться на одном уровне во избежание существенной погрешности за счет гидростатического давления столба наполнителя.

Манометрические термометры выпускаются с основной погрешностью 0,5; 1; 1,5 и 2,5 %. Они бывают показывающими, самопишущими и комбинированными. По желанию заказчика приборы могут поставляться с двухпозиционным (электроконтактным) или пневматическим ПИД-регулятором.

Типы и технические характеристики манометрических термометров приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Технические характеристики манометрических термометров

	Показывающие	Самопишущие	Комбинированные	Рабочий диапазон, °С
Газовые	ТПГ	ТСГ	ТКГ	-200 +600
Конденсационные	ТПП	ТСП	ТКП	-150 +300
Жидкостные	ТПЖ	ТСЖ	ТКЖ	-50 + 800

## 2.2.2. Термоэлектрические термометры

К термоэлектрическим термометрам относятся средства измерения, у которых в качестве датчиков используются термопары. Если соединить два разнородных проводника и место соединения нагреть, то на свободных концах проводников возникнет ЭДС, значение которой будет зависеть от материала проводников и от температуры, до которой нагрето место соединения (так называемый "горячий спай"). Говоря точнее, ЭДС будет зависеть от разницы температур горячего спаива и свободных концов, так как при повышении температуры свободных концов ЭДС будет уменьшаться, и, если температуры горячего спаива и свободных концов одинаковы, то ЭДС будет равна нулю. Это обстоятельство необходимо учитывать при контроле температуры с помощью термопар, поскольку свободные концы термопары обычно находятся вблизи от нагретого объекта, и их температура отличается от комнатной.

В качестве материалов термопар используются сплавы, которые обладают чистотой состава, стабильностью свойств во времени и приемлемой чувствительностью (отношением изменения термо-ЭДС к изменению температуры).

Схема термопары изображена на рисунке 2.6. Обычно термопары изготавливаются путем скручивания и сваривания проводников диаметром 0,5 или 3,2 мм. (1). На проводники надеваются термостойкие электроизолирующие бусы (2), обычно фарфоровые. Термопара помещается в защитный чехол (3), к концу которого крепится клеммная головка (4) с крышкой (5).

Защитный чехол изготавливается из жаростойких сталей, например ХН45Ю, до 1300 °С или из керамических материалов (фарфор, лейкосапфир), до температуры 1800 °С.

фер изготавливается из эпоксидной смолы, насыщенной мелкодисперсным порошком вольфрама. Демпфер герметизируется в корпусе с помощью эпоксидной смолы 7.

Искатели могут излучать непрерывные ультразвуковые колебания, если на них подать гармонические колебания. При использовании в приборах для измерения расхода ультразвуковые искатели запитываются от генератора прямоугольных импульсов малой длительности (порядка 1 мксек) и со значительной амплитудой (0,2-2кВ). Такое возбуждение искателя называется ударным возбуждением.

Принцип действия ультразвукового расходомера заключается в следующем (рисунок 2.23).

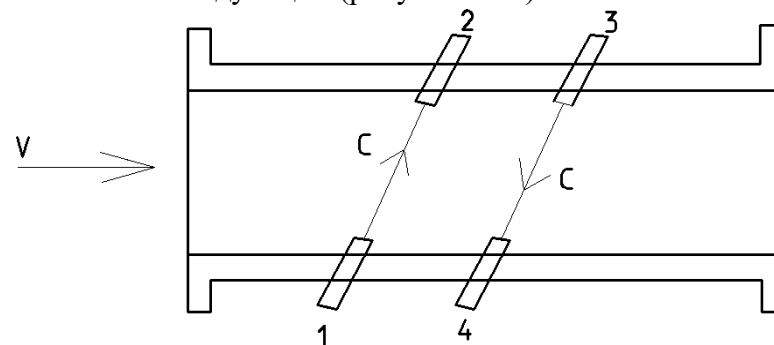


Рис. 2.23. Принципиальная схема ультразвукового расходомера

Датчик ультразвукового расходомера состоит из патрубка с фланцами для присоединения к трубопроводу. В патрубке смонтированы 4 электрода: два излучающих (1, 3) и два приемных (2,4). Электроды расположены под углом к оси навстречу друг другу. Излучающие искатели под воздействием электрического импульса, поданного на пьезоэлемент, излучают ультразвуковой импульс, который, пройдя через жидкость, заполняющую патрубок, попадает на приемные искатели. Под воздействием ударной акустической волны пьезоэлемент искателя подвергается сжатию, вследствие чего на обкладках пьезоэлемента появляется

Таблица 2.6.

Скорости распространения УЗК в среде

Вид среды	Скорость распространения м/сек
Воздух	331
Вода	1451
Нержавеющая сталь	5600
Эпоксидная смола	2330
Титанат-цирконат свинца	3300

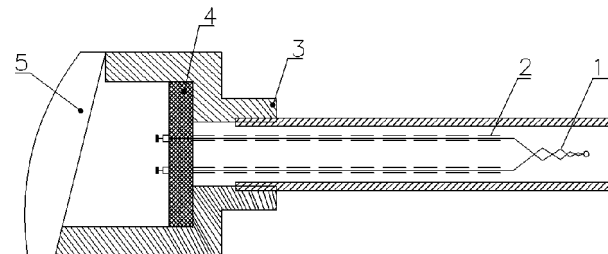


Рис. 2.6. Устройство термопары

Датчики ультразвуковых приборов, содержащие пьезоэлементы, называются искателями.

На рисунке 2.22. изображена конструкция искателя.

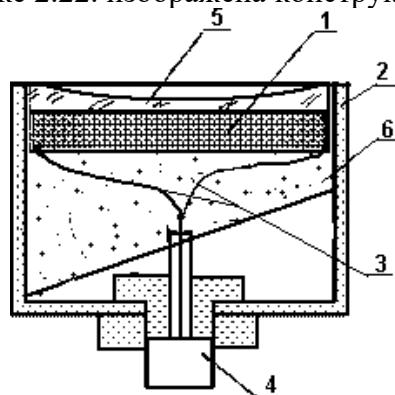


Рис. 2.22. Конструкция искателя

Пьезоэлемент 1, изготовленный обычно на основе керамики ЦТС и покрытый с обеих торцевых сторон тонкой серебряной пленкой (электроды), нанесенной гальваническим способом, устанавливается в металлический корпус 2. К серебряным электродам припаиваются проводники 3, которые соединены с разъемом 4. Снаружи к пьезоэлементу без зазора крепится фокусирующая линза 5, изготовленная из плексигласа или из эпоксидной смолы. С другой стороны пьезоэлемента, также без зазора, расположен демпфер 6, назначение которого состоит в том, чтобы основная энергия излучения была направлена в одну сторону. Демп-

В таблице 2.3. приведены основные технические характеристики применяемых термопар.

Таблица 2.3.

Типы и технические характеристики термопар

Обозначение	ТВР	ТПШ	ТХА	ТХК
Тип	Вольфрам-рений	Платинородий-платина	Хромель-алюмель	Хромель-копель
Диапазон темпер.	0-2200	0-1300	-200 + 1000	-200 + 600
Максим. темп-ра	2500	1600	1300	800
Материал электродов	ВР-5: 95% W, 5% Re; ВР-20: 80% W, 20% Re.	ПР-10: 90% Pt, 10% Rh; Pt.	Хромель 90,5% Ni, 9,5% Cr Алюмель 94,5% Ni, остальное Al, Mn, Co .	Хромель Копель 56% Cu, 44% Ni.
Чувствительность мкВ/°С	5	10	40	80
Погрешность	1%	0,25%	0,5%	0,7%

При длительном использовании в нагретом состоянии погрешность термопар возрастает, поэтому требуется периодически проводить их поверку.

2.2.3. Измерение термо-ЭДС

Простейшим прибором для измерения значения термо-ЭДС является милливольтметр магнитоэлектрической системы. Шкала милливольтметра градуируется в градусах Цельсия применительно к определенному типу термопар,

который указывается на шкале прибора. Термопара соединяется с прибором с помощью специальных для каждого типа термопар компенсационных проводов, при этом холодный спай как бы удаляется от нагретого объекта, благодаря чему уменьшается погрешность измерения, возникающая при изменении температуры свободных концов термопары. После монтажа прибора его стрелка с помощью арретира устанавливается на цифру, соответствующую комнатной температуре. Сопротивление компенсационных проводов после монтажа измеряется, его значение в сумме с сопротивлением дополнительной катушки должно точно соответствовать значению сопротивления линии  $R_L$ , указанному на шкале прибора (обычно  $R_L = 5 \text{ Ом}$ ).

Пирометрические милливольтметры выпускаются с основной погрешностью 1%, 1,5% и 2,5%. Выпускаются также регулирующие (электроконтактные) милливольтметры.

Для более точного измерения термо-ЭДС применяются автоматические потенциометры (класса 0,5 и 0,25%). Принципиальная схема автоматического потенциометра изображена на рисунке 2.7.

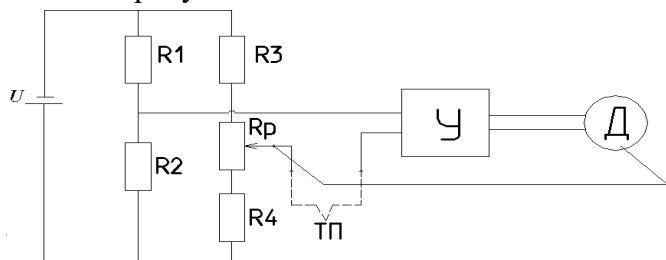


Рис. 2.7. Принципиальная схема автоматического потенциометра

Напряжение  $U$  от источника питания подается на мостовую схему, образуемую резисторами  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и  $R_p$ , где  $R_1 - R_4$  постоянные сопротивления, а  $R_p$  – сопротивление реохорда. Термопара ТП подключается таким образом, что термо-ЭДС направлена навстречу напряжению в

## 2.4.5. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые волны, как и звуковые, представляют собой механические (акустические) колебания частиц упругой среды. Если слышимые человеческим ухом акустические колебания имеют частоту в диапазоне 20 Гц - 20 кГц, то частота применяемых в приборах акустических колебаний находится в диапазоне 0,5-20 МГц.

Ультразвуковые колебания создаются с помощью пьезопреобразователя, представляющего собой пластину из естественного минерала (например, кварца) или из специально изготовленных керамических материалов (например, пластин  $T_i V_a$  (титанат бария), ЦТС (цирконат-титанат свинца), на плоскостях которой нанесены тонкие металлические (серебряные) пленки, образующие электроды. При приложении напряжения к пластине преобразователя ее толщина изменяется в соответствии со значением и знаком приложенного напряжения. И, наоборот, при сжатии или растяжении пластины на ее электродах возникает ЭДС, пропорциональная усилию сжатия. Это явление называется пьезоэффектом. Если на пластину подать переменное напряжение, допустим - с частотой 5 МГц, то толщина пластины будет изменяться с частотой 5 МГц и упругие колебания пластины будут передаваться контактирующей с ней среде и распространяться в ней.

Искусственные керамические пластины обладают большим пьезоэффектом, чем естественные, поэтому они нашли более широкое применение.

Скорость распространения ультразвука в среде зависит от вида среды и ее температуры.

В таблице 2.6. приведены значения скоростей распространения ультразвука в различных средах при температуре  $0^\circ \text{C}$ .

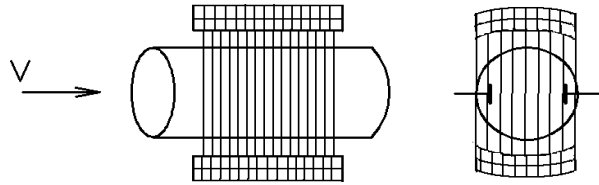


Рис. 2.21. Конструкция датчика электромагнитного расходомера.

Таким образом, измеряя ЭДС на электродах с помощью вторичного прибора (электронного преобразователя и измерителя), можно определить среднее значение мгновенного расхода. Понятно, что электромагнитные расходомеры могут применяться только для измерения расхода электропроводной жидкости. Достоинством электромагнитных расходомеров является возможность измерения расхода пульпы (жидкости, содержащей твердые частицы), так как внутри патрубка нет конструктивных элементов, провоцирующих отложение твердых частиц.

Промышленностью выпускается несколько типов электромагнитных расходомеров, например:

- ИР-61, с диапазонами измерения от 20 до 200 м<sup>3</sup>/ час и с основной погрешностью 0,5-4%;

- РЭН-1, с диапазонами измерения от 0,2 до 20 м<sup>3</sup>/час и с основной погрешностью 3,5%; прибор имеет нормализованный выход 0-5 мА;

- ВЗЛЕТ-ЭР, с диапазонами измерения расходов агрессивных сред от 0,1 до 760 м<sup>3</sup>/ час (внутренний диаметр патрубка соответственно от 10 до 150 мм) и с основной погрешностью 0,5-3% - по требованию заказчика; понятно, что цена более точных приборов выше. Расходомеры ВЗЛЕТ-ЭР имеют нормализованный токовый выход 4-20 мА, что позволяет наряду с мгновенным расходом измерять суммарный расход, а также использовать ПИД-регулятор для автоматического регулирования расхода. Изготовитель расходомеров ВЗЛЕТ-ЭР - ЗАО "Взлет", Санкт-Петербург.

диагонали моста. Разность между этими величинами поступает на усилитель У, сигнал с усилителя подается в двигатель Д, который перемещает движок реохорда таким образом, чтобы уменьшить эту разность до нуля. Одновременно и синхронно с движком реохорда перемещается указатель прибора.

Автоматические потенциометры бывают показывающими, записывающими и регулирующими.

Наиболее совершенными приборами для измерения термо-ЭДС являются приборы фирм "Метран" и "Элемер", которые будут описаны ниже.

#### 2.2.4. Термометры сопротивления

Принцип действия термометров сопротивления основан на использовании зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента датчика от температуры.

В соответствии с материалами чувствительного элемента нашли наибольшее применение медные (ТСМ), платиновые (ТСП) и германиевые термометры сопротивления (ТСГ).

Чувствительный элемент проволочного термометра сопротивления обычно представляет собой слюдяную пластинку, на которую бифилярной намоткой (с целью уменьшения наводок) наматывается проволока диаметром 0,05-0,08 мм. Концы проволоки припаиваются к серебряным выводам. Сопротивление проволочного термометра при нулевой температуре составляет 50 или 100 Ом. Чувствительный элемент монтируется в защитном чехле, конструкция которого аналогична конструкции защитного чехла термопары.

Германиевые термометры сопротивления применяются для измерения низких температур, а также в случаях, когда необходимо измерять мгновенные изменения температуры с быстродействием до 0,05 секунд. В этих случаях применяются так называемые бусиновые термометры сопротивления, представляющие собой германиевый шарик

(бусинку) диаметром 0,5-1 мм, в которую впаяны 2 проводника. Бусиновые германиевые термометры типа СГ 1-18 применяются для измерения температуры в интервале - 90 +120. При измерении температуры в диапазоне 34-40 °С цена деления прибора может составлять 0,05 °С. Такие термометры могут использоваться в качестве быстродействующих медицинских термометров.

Для измерения значения сопротивления термометра сопротивления применяются следующие вторичные приборы: логометры, электронные мосты, цифровые приборы фирм "Элемер" и "Метран".

Логометр (рисунок 2.8) представляет собой прибор магнитоэлектрической системы, имеющий две скрещенные рамки, перемещающиеся в неравномерном зазоре магнитопровода таким образом, что при повороте рамок одна из них попадает в поле с более высокой магнитной индукцией (меньший зазор), а другая в поле с более низкой магнитной индукцией. Последовательно с первой рамкой включен резистор, сопротивление которого равно сопротивлению термометра сопротивления при нулевой температуре. Последовательно со второй рамкой включается термометр сопротивления. Ток, протекающий через резистор с постоянным сопротивлением, создает вращающий момент; ток, протекающий через термометр сопротивления, создает противодействующий момент.

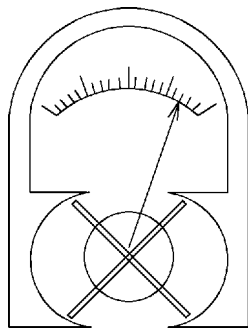


Рис.2.8. Принципиальная схема логометра

сти с плотностью, отличной от плотности воды, необходимо вводить поправку. Так, если плотность контролируемой жидкости будет равна 1,44 г/см<sup>3</sup>, то показания прибора следует уменьшить в 1,2 раза ( $\rho$ ). Следовательно, при показании прибора 12 м<sup>3</sup>/час действительное значение расхода жидкости составит 10 м<sup>3</sup>/час.

#### 2.4.4. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на использовании явления электромагнитной индукции. При перемещении проводника в магнитном поле на концах проводника возникает электродвижущая сила, значение которой находится по формуле 2.3.

$$E=BdV, \quad (2.3)$$

где E - ЭДС; d - длина проводника, пересекающего магнитное поле (в данном случае она равна внутреннему диаметру трубы); V - скорость движения проводника (равная средней скорости протекания жидкости).

Датчик электромагнитного расходомера (рисунок 2.21) представляет собой патрубок с фланцами, устанавливаемый в разрез трубопровода с аналогичным внутренним диаметром. На наружном диаметре патрубка крепится катушка, на которую подается переменное напряжение для образования электромагнитного поля. В патрубке крепятся два диаметрально расположенных электрода, изолированных от стенки. В качестве материала патрубка обычно используется нержавеющая сталь. При измерении расхода жидкостей, для которых нержавеющая сталь не обладает достаточной химической стойкостью, внутренняя поверхность патрубка покрывается кислотостойкими эмалями, а электроды при этом изготавливаются из графита.

Аналогичная катушка с перемещающимся внутри нее сердечником имеется у вторичного прибора. На первичные обмотки катушек подается переменное напряжение. Вторичные обмотки ротаметра и прибора ЭПИД соединены двумя проводниками, как указано на рисунке 2.20.

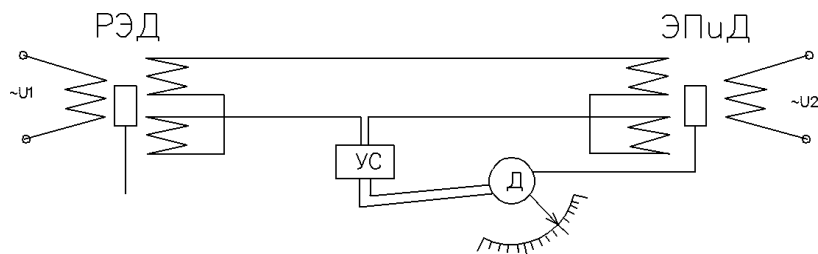


Рис. 2.20. Принципиальная электрическая схема металлического ротаметра

В положении электрического равновесия сердечники занимают в катушках одинаковые положения. При перемещении сердечника в катушке ротаметра вследствие изменения расхода изменяются индукции в верхней и нижней секциях вторичной обмотки, в результате чего нарушится электрическое равновесие схемы, и на усилитель поступит сигнал рассогласования. Усиленное напряжение попадет на обмотку двигателя прибора ЭПИД, который, вращаясь, переместит с помощью лекала сердечник прибора ЭПИД таким образом, чтобы он занял положение, аналогичное положению сердечника внутри катушки ротаметра. Одновременно с этим двигатель перемещает индикатор вторичного прибора.

Основная приведенная погрешность приборов ЭПИД составляет 0,5%. Приборы ЭПИД имеют записывающее устройство, могут быть снабжены интеграторами для определения суммарного расхода и ПИД- регуляторами.

Металлические ротаметры градуируются по воде на специальной, прошедшей метрологическую аттестацию градуировочной установке. При измерении расхода жидко-

При повышении температуры сопротивление термометра увеличивается, а сила тока, протекающего через него, уменьшается. Поэтому противодействующий момент становится меньше вращающего момента, и рамки будут поворачиваться на оси. При этом первая рамка будет попадать в более слабое магнитное поле, а вторая - в более сильное магнитное поле. При равенстве вращающего и противодействующего моментов движение рамок прекратится, и стрелка, прикрепленная к оси прибора, покажет значение температуры.

Электрическая схема логометра приведена на рисунке 2.9.

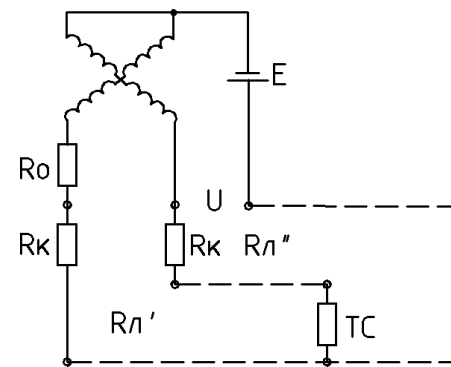


Рис.2.9. Электрическая схема логометра

Логометр подключается к термометру сопротивления проводниками. Рекомендуется для соединения использовать три проводника, в соответствии с рисунком 2.9. При таком соединении один из соединительных проводников включается последовательно с постоянным резистором, другой - последовательно с термометром сопротивления. При нагревании проводников вследствие изменения комнатной температуры в равной степени изменятся сопротивления в обеих цепях, и это не скажется на показаниях прибора. Логометры градуируются в градусах Цельсия при условии, что сопротивления соединительных проводников

имеют постоянную величину (обычно 5 Ом); значение сопротивления соединительных проводников и тип термометра сопротивления указываются на шкале прибора. Поэтому после монтажа прибора измеряется сопротивление соединительных проводников и последовательно с ними включаются катушки, намотанные манганиновой проволокой таким образом, чтобы их суммарное сопротивление с сопротивлением проводника линии составляло 5 Ом.

Погрешность серийно выпускаемых промышленностью логометров (типов Л-64И и Ш-4540) составляет 1% и 2,5%.

Для измерения температуры с помощью термометра сопротивления также применяются автоматические мосты КПМ (показывающие) и КСМ (записывающие) класса 0,5 и 0,25. На Рисунке 2.10. изображена принципиальная схема автоматического моста.

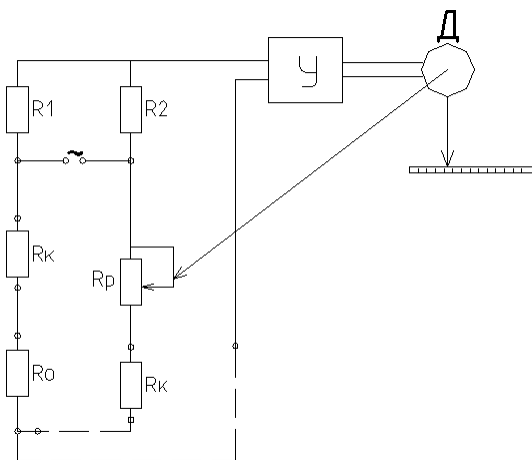


Рис.2.10. Принципиальная схема автоматического моста

Плечи моста образуют два сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , термометр сопротивления ( $R_0$ ), сопротивление реохорда  $R_p$ , сопротивления соединительных проводников  $R_l$  и сопротивления подгоночных катушек  $R_k$ .

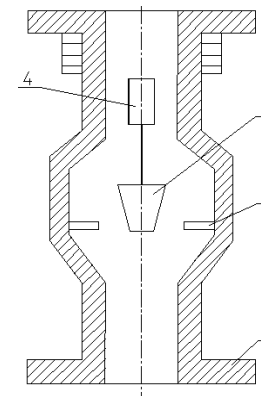


Рис. 2.19. Конструкция металлического ротаметра РЭД

Металлический ротаметр состоит из нержавеющей стали корпуса 1, диафрагмы 2, конического поплавка 3, магнитного сердечника 4 и катушки 5, размещенной снаружи ротаметра. Серийно выпускаемые ротаметры имеют название РЭД (ротаметр с электрическим датчиком), а вторичные приборы к ним называются ЭПИД (электронный прибор с индуктивным датчиком).

Металлические ротаметры монтируются на прямом вертикальном участке трубопровода. Они применяются для измерения расходов чистых жидкостей, в том числе агрессивных жидкостей, к которым нержавеющая сталь является химически стойкой. Максимальное значение измеряемых расходов 16 м<sup>3</sup>/час.

При изменении расхода жидкости изменяется подъемная сила, действующая на поплавок, и он перемещается внутри диафрагмы. Это сопровождается изменением зазора между коническим поплавком и диафрагмой и соответствующим изменением скорости потока и подъемной силы, которая уравнивается весом поплавка. Положение поплавка фиксируется индукционным датчиком, состоящим из трехсекционной катушки и перемещающегося внутри нее сердечника из железа Армко.

При равенстве подъемной силы и веса поплавка, он останавливается против определенной черты на стекле. Если скорость, а соответственно расход вещества, увеличивается, то динамический напор и подъемная сила вначале превышают вес поплавка. Поэтому поплавок поднимается. Но при подъеме поплавок увеличивается зазор между поплавком и конической трубой, в результате чего скорость потока снижается до тех пор, пока подъемная сила вновь не сравняется с весом поплавка. Таким образом, вертикальное перемещение поплавка будет зависеть от расхода вещества, и значение расхода определяется по положению поплавка относительно шкалы на трубе. Так как в положении равновесия подъемная сила равна весу поплавка, то перепад давления на поплавке (динамический напор) будет постоянен, что и явилось основанием для названия этой группы приборов.

Косые пазы на буртике поплавка инициируют его вращение вокруг оси, благодаря чему поплавок занимает устойчивое положение. Хотя не у всех приборов постоянного перепада поплавков вращается, все приборы, основанные на этом принципе действия, называются ротаметрами.

Ротаметры градуируются по воде или по воздуху. При измерении расхода других сред необходимо вводить поправку из условия, что при увеличении плотности в «п» раз действительное значение расхода будет меньше в « $\frac{1}{h}$ » раз.

Диапазон измерения расхода газа стеклянными ротаметрами составляет 1-16 м<sup>3</sup>/час, диапазон измерения расхода воды - до 16 м<sup>3</sup>/час. Основная приведенная погрешность стеклянных ротаметров 1,5 - 4%.

Конструкция металлического ротаметра показана на рисунке 2.19.

При нагревании ТС его сопротивление увеличивается пропорционально температуре, при этом равновесие моста нарушается, в диагонали моста возникает переменное напряжение разбаланса, которое подается на усилитель; усиленное напряжение поступает на двигатель, который перемещает движок реохорда до установления равновесия моста. Вместе с реохордом от двигателя перемещается указатель, фиксирующий значение температуры.

Современными приборами для измерения температуры с помощью термометров сопротивления, а также и термопар являются цифровые приборы фирм "Элемер" и "Метран".

Отметим несколько приборов фирмы "Элемер".

1) Датчики температуры с встроенными нормирующими преобразователями. Например: ТСПУ - термометр сопротивления платиновый с унифицированным выходом (0-5 мА, 4-20 мА, 0-10 В); ТХАУ - термопара хромель-алюмелевая с унифицированным выходом.

Погрешность платиновых термометров сопротивления 0,1%, погрешность хромель-алюмелевых термопар 0,5%.

2) Цифровые приборы для измерения унифицированных аналоговых сигналов, поступающих с датчиков измерения температуры, а также с датчиков давления, расходов, уровней, плотностей и других параметров.

Например: ТМЦ-9210, имеющие 4 разряда цифр, погрешность - одна цифра последнего разряда (0,1%).

3) Щитовые приборы для измерения унифицированных аналоговых сигналов.

Например: ИРТ-5320 - измеритель-регулятор технологический. Приборы этой серии помимо 4-разрядной индикации имеют регуляторы разных типов: контактные, оптоэлектронные ключи, ПИД-регуляторы.

4) Регуляторы технологические электрические. Например: РТЭ-5260. Вход регуляторов унифицированный, выход - токовый, законы регулирования П, ПИ, ПИД.

5) Технологические многоканальные приборы с унифицированным входом.

Например: ТМ-5231, имеющий 8 каналов с двумя уставками каждый; время обегания составляет 1,5 сек; имеется встроенный контроллер связи с ЭВМ РС по последовательному интерфейсу PS232.

Аналогичные приборы фирмы "Метран" имеют более высокие показатели точности и надежности (до 30%).

### 2.2.5. Пирометры излучения

Пирометрами называются приборы, измеряющие температуру бесконтактным методом, по излучению нагретого тела.

Все тела, имеющие температуру выше абсолютной температуры, излучают энергию, связанную с движением зарядов, в виде электромагнитных волн с разной длиной волны.

Интенсивность излучения и спектр волн зависят от температуры тела. При низких температурах (до 600 °С) преобладают инфракрасные волны (длина волны 0,76 -1000 мкм), при более высоких температурах - световые волны (видимый глазом свет, длина волны 0,4-0,76 мкм), при высоких температурах (более 1000 °С) - инфракрасные волны (длина волны 0,01-0,1 мкм).

На рисунке 2.11. показана зависимость энергетической светимости (мощности излучения с 1см<sup>2</sup> поверхности тела) и спектра длин волн - от температуры.

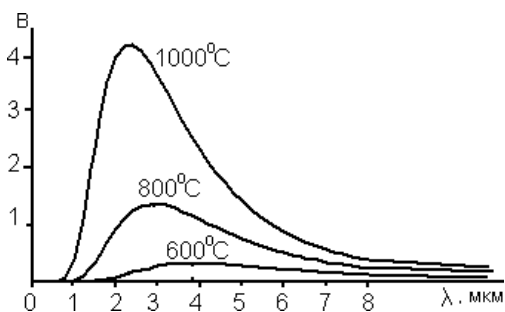


Рис. 2.11. Спектр излучения нагретого тела, где: В – электрическая светимость: мощность излучения в Вт с м<sup>2</sup>

### 2.4.3. Расходомеры постоянного перепада давления

Расходомеры постоянного перепада, так называемые ротаметры, бывают стеклянные и металлические. Стеклянные ротаметры применяются для измерения расходов прозрачных жидкостей и газов, металлические - для измерения расходов чистых неагрессивных и агрессивных жидкостей (не имеющих твердых включений).

Конструкция стеклянного ротаметра показана на рисунке 2.18.

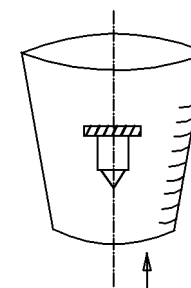


Рис. 2.18. Стеклянный ротаметр

Стеклянный ротаметр представляет собой прозрачную стеклянную трубку конической формы, внутри которой расположен металлический поплавок с буртиком, в котором имеются косые пазы. На трубке нанесены деления. Ротаметры монтируются на вертикальных трубопроводах.

При протекании вещества (жидкости или газа) на поплавок действует динамический напор; произведение динамического напора на площадь поплавка является подъемной силой.

$$P = S g \frac{V^2}{2g}, \quad (2.2)$$

где P - подъемная сила, S - площадь максимального сечения поплавка, V - скорость потока, g - удельный вес,

$g$  - ускорение силы тяжести.

Сужающие устройства устанавливаются на прямых (горизонтальных и вертикальных) участках трубопровода. Длина участка трубы для создания равномерности потока и уменьшения завихрений должна быть не меньше 7-10 диаметров трубы до сужающего устройства и не менее 5-7 диаметров после него. Диафрагма обычно помещается в специальную камеру, у которой с двух сторон от диафрагмы имеются патрубки для подключения дифференциального манометра, измеряющего разность давлений. Шкала дифманометра градуируется в единицах расхода.

Для измерения перепада давления в производственных условиях применяются поплавковые (ДП), мембранные (ДМ), сильфонные (ДС) и колокольные дифманометры (ДК). В настоящее время эти приборы вытесняются более точными и более надежными дифманометрами типа "Сапфир-22-ДД" с диапазонами измерения от 25 до 2500 мм в. ст. и основной приведенной погрешностью 0,25, 0,5 и 1%.

Необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства:

1) В соответствии с формулой 2.1. зависимость расхода от перепада давления квадратичная, что, во-первых, приводит к различной точности измерения в начале и конце шкалы; во-вторых, при этом нельзя измерять суммарный расход. Поэтому в комплекте дифманометров могут быть применены линеализаторы шкалы.

2) При измерении расходов по перепаду давления возникает дополнительная погрешность вследствие изменения плотности измеряемой среды. При постоянстве этого параметра может быть введена поправка, значение которой вычисляется по формуле 2.1.

3) Дифманометры "Сапфир-22-ДД" имеют стандартный выход, что позволяет применять их не только для измерения, но и для регистрации, суммирования и регулирования расхода по законам регулирования П, ПИ, ПИД.

О температуре нагретого тела можно судить, измеряя яркость свечения, суммарную мощность излучения, мощность монохроматического излучения (узкий спектр волн) или спектральную мощность излучения (соотношение излучений для двух длин волн). Необходимо отметить, что эти параметры в значительной мере зависят от материала нагретого тела, его формы и состояния поверхности. Тела из разных материалов и с разным состоянием поверхности при одной и той же температуре излучают по-разному, причем эта разница весьма значительна, и ее надо уметь учитывать. Неполноту излучения нагретого тела определяют по отношению к излучению так называемого абсолютно черного тела, излучение которого принимается за единицу. В качестве имитатора абсолютно черного тела принимается дно глубокого отверстия в графитовом стержне.

Отношение излучения реального тела к излучению абсолютно черного тела характеризуется коэффициентом излучения. Так, для стали коэффициент монохроматического излучения = 0,37-0,44, для графита = 0,8-0,9. В таблице 2.4 приведены значения разницы действительной и измеренной температуры для трех типов приборов – полного, монохроматического излучения и спектрального отношения.

Таблица 2.4.

Разница действительной и измеренной температур

Измеряемая температура	$\Delta T$ для стали °C			$\Delta T$ для графита °C		
	Полное излучение	Монохром. излучение	Спектральное отношения	Полное излучение	Монохром. излучение	Спектральное отношения
1000°C	200	40	2	60	10	–
1600°C	220	80	5	100	30	3
2200°C	400	150	10	130	50	5

Для того чтобы ввести поправку к результатам измерения температуры, необходимо определить действитель-

ное значение температуры - то ли расчетным путем, то ли по результату измерения более точным методом.

переменное сопротивление для

### 2.2.5.1. Пирометры полного излучения

Одним из пирометров полного излучения является прибор типа РАПИР. Прибор состоит из телескопа ТЕРА-50 и измерительного прибора. На рисунке 2.12. изображена принципиальная схема телескопа ТЕРА-50.

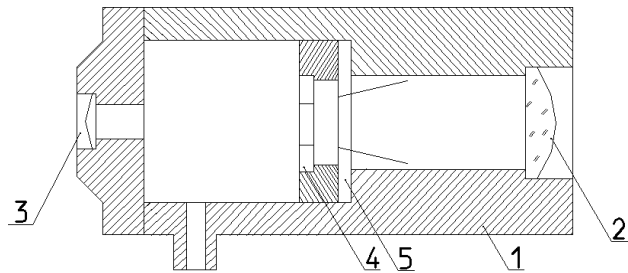


Рисунок 2.12 - Принципиальная схема телескопа ТЕРА-50.

1. Корпус. 2. Окуляр. 3. Объектив. 4. Термобатарея. 5. Диафрагма.

Телескоп устанавливается на подставке возле нагретого тела (НТ) и через окуляр наводится на НТ или на окно в печи, через которое наблюдается НТ. Расстояние от телескопа до НТ определяется размерами НТ и значением коэффициента визирования телескопа (у ТЕРА-50 он равен  $1/20$ ; коэффициент визирования - это отношение максимально допустимого расстояния от телескопа до НТ к минимальному размеру НТ; так, при диаметре НТ 50 мм и при коэффициенте визирования 20 расстояние телескопа от НТ не должно превышать 1000 мм).

Поток излучения от НТ через окуляр 2 попадает на горячие спай термобатареи 4, состоящей из 10 последовательно соединенных в виде звездочки хромель-копелевых термопар. Суммарное напряжение термобатареи, пропорциональное полной энергетической светимости НТ, подается на измерительный прибор, проградуированный в градусах Цельсия, в котором имеется

ющего устройства, температуры и вязкости вещества и соотношения внутреннего диаметра трубопровода и диаметра сужающего устройства;  $F_0$  - площадь отверстия сужающего устройства ( $\text{м}^2$ );  $g$  - ускорение ( $\text{м/сек}^2$ );  $P_1 - P_2$  - перепад давления ( $\text{Па}$ );  $\rho$  - удельный вес  $\text{н/м}^3$ .

Применяются 3 типа сужающих устройств: диафрагма, сопло и труба Вентури (рис. 2.17.).

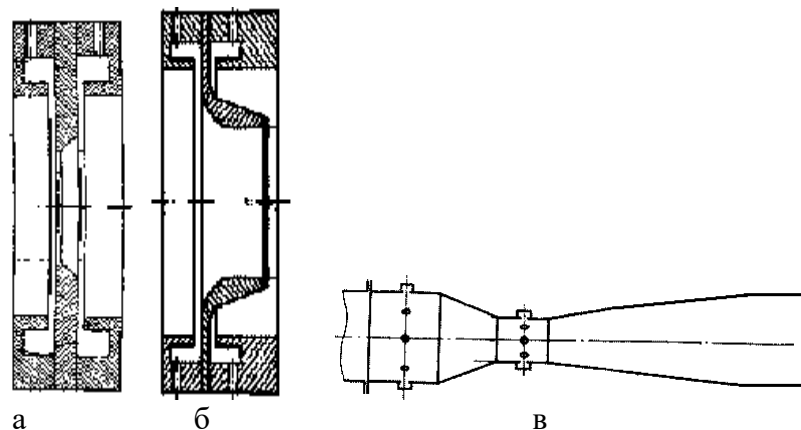


Рис. 2.17. Сужающие устройства  
а). Диафрагма. б). Сопло. в). Труба Вентури

Сужающие устройства изготавливаются в строгом соответствии с допусками на размеры и техническими требованиями к остроте кромки отверстия, шероховатости и другим параметрам устройства. Благодаря этому имеется возможность измерять расходы приборами, градуировка которых выполнена расчетным способом по формуле 2.1.

Наиболее часто в качестве сужающих устройств используются диафрагмы, так как их проще изготовить. Сопла и трубы Вентури применяются на трубопроводах больших диаметров и в тех случаях, когда нежелательна потеря давления вещества на сужающем устройстве - она максимальна при применении диафрагмы.

## Глава 2.4. Измерение расходов

### 2.4.1. Методы измерения расходов

В производственных условиях возникает необходимость измерения количества вещества (жидкостей, газов, пара, пульпы), протекающего по трубопроводам как в единицу времени, так и за некоторое время. Расход вещества в единицу времени называется мгновенным расходом. Мгновенный расход измеряется в следующих единицах: м<sup>3</sup>/сек, м<sup>3</sup>/час, л/мин, л/час, кг/час, т/час. Суммарный расход измеряется в единицах объема или массы: м<sup>3</sup>, л, кг, т.

Наиболее распространены в промышленности следующие методы измерения расходов:

- по перепаду давления;
- расходомеры постоянного перепада;
- электромагнитные расходомеры;
- ультразвуковые расходомеры;
- вихревые расходомеры;
- тепловые расходомеры;
- щелевые расходомеры (расходомеры истечения).

### 2.4.2. Измерение расходов по перепаду давления

Этот метод основан на измерении разницы давлений с двух сторон сужающего устройства, установленного в разрез трубопровода. В соответствии с уравнением Бернулли:

$$Q = a F_0 \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad 2.1.$$

где  $Q$  - мгновенный расход (м<sup>3</sup>/сек);  $F_0$  - табличное значение коэффициента расхода, зависящее от вида потока: для ламинарного потока  $a = 0,5$ , для турбулентного потока достигает 0,93 в зависимости от типа и характеристик сужа-

введения поправки, обусловленной неполнотой излучения НТ. Визирование телескопа на НТ с целью направления пучка на горячие спаи термобатареи осуществляется регулируемой диафрагмой 4.

Пирометры РАПИР выпускаются со следующими диапазонами измерения: 100-500, 500-700, 700-1100, 1100-2000, 2000-2200, 2200-2500С.

Основная приведенная погрешность прибора равна 1,5% от диапазона измерения. При этом методическая погрешность за счет неполноты излучения нагретого тела может составлять 200-400 °С, если не будет введена поправка. Быстродействие пирометра 4 сек.

### 2.2.5.2. Пирометры частичного излучения

Значение методической погрешности, возникающей за счет неполноты излучения, может быть снижено, если измерять не весь энергетический поток НТ, а узкую часть спектра излучения. Для этой цели используются селективные приемники излучения (фотодиоды, фоторезисторы) или термоприемники со светофильтрами. На этом принципе основана работа приборов типа ФЭП-4, ФЭП-8, Смотрич-5.

На рисунке 2.13. приведена принципиальная схема пирометра ФЭП-4.

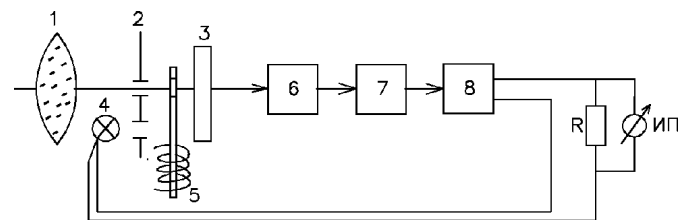


Рисунок 2.13 - Принципиальная схема пирометра ФЭП-4.  
1. Объектив. 2. Диафрагма. 3. Приемник излучения (фоторезистор PbS с германиевым светофильтром). 4. Лампа накаливания. 5. Модулятор вибрационного типа. 6. Усилитель переменного тока. 7. Фазочувствительный детектор. 8. Усилитель постоянного тока.

Пирометр ФЭП является прибором компенсационного типа. Световой поток от НТ и световой поток от лампы накаливания 4 попеременно, с помощью модулятора 5, поступают на приемник излучения 3, на котором образуется переменное напряжение, пропорциональное разнице потоков. Это напряжение усиливается, затем поступает на фазовый детектор, определяющий, какой из потоков больше. С детектора сигнал идет на усилитель постоянного тока (УПТ). Ток с выхода УПТ протекает через постоянное сопротивление R и нить лампы накаливания. Сила тока автоматически устанавливается такой, чтобы поток от лампы накаливания был равен потоку от нагретого тела.

Измерительный прибор ИП измеряет падение напряжения на сопротивлении R, пропорциональное температуре НТ. В качестве измерительного прибора используется автоматический потенциометр.

Диапазоны измерения пирометра ФЭП: 100-300, 200-500, 500-900, 600-1100С. Показатель визирования 1/20 - 1/70. Измерение температуры проводится в инфракрасном диапазоне в интервале длин волн 1,8-3,5 мкм. Основная приведенная погрешность прибора 1-1,5%, методическая погрешность - до 40-150С. Быстродействие ФЭП-4 - 1 сек.

### 2.2.5.3. Пирометры монохроматического излучения

Принцип действия этого вида пирометров основан на сравнении на одной длине волны, равной 0,65 мкм (красный свет), яркостей свечения НТ и нити лампочки накаливания. Монохроматичность излучений достигается за счет применения светофильтра. Эти приборы иногда называются пирометрами с исчезающей нитью. На рисунке 2.14 показана принципиальная схема пирометра с исчезающей нитью типа "Проминь".

Измерительный элемент изготавливается из искусственного монокристалла сапфира; в верхней части элемента имеется тонкая мембранная площадка, на которой размещены пленочные кремниевые тензодатчики 2.

Изображенный на рисунке 2.16 манометр предназначен для измерения давления агрессивных сред. Он оснащен дополнительной разделительной камерой с "вялой" (неупругой) мембраной и корпусной деталью, изготовленной из нержавеющей стали, имеющей присоединительный ниппель 7. Пространство между вялой и измерительной мембранами заполнено инертной кремнийорганической жидкостью. Измеряемое давление поступает через ниппель на вялую мембрану, передается через жидкость в измерительный элемент, вызывая перемещение мембранной площадки. Это перемещение передается тензометрическим датчикам, включенным в мостовую схему. В диагонали мостовой схемы появляется напряжение, пропорциональное измеряемому давлению, которое затем преобразуется в электронном устройстве 3 в стандартный выходной сигнал (0-5 мА, 4-20 мА, 0-10 В).

Сапфировый упругий элемент обладает высокой стабильностью во времени, что позволяет фирме "Элемер" выпускать приборы типа "Сапфир-22" с основной приведенной погрешностью 0,25, 0,5 и 1%.

В таблице 2.5. приведена номенклатура манометров фирмы "Элемер".

Таблица 2.5.

Номенклатура манометров фирмы «Элемер»

Тип прибора	Измеряемый параметр	Диапазон измерения
С-22ДА	абсолютное давление	250 мм в.ст. – 160 кг/см <sup>2</sup>
С-22ДИ	избыточное давление	25 мм в.ст.- 1000 кг/см <sup>2</sup>
С-22В	разрежение	25 мм в.ст.- 1 кг/см <sup>2</sup>
С-22ДиВ	давление и разрежение (мановакууметр)	25 мм в.ст. – 10 кг/см <sup>2</sup>
С-22-ДД	разность давлений (дифманометр)	25-2500 мм в.ст.

трубки изготавливаются из бронзы и латуни, для измерения агрессивных сред - из нержавеющей стали.

Сильфонные манометры применяются в качестве записывающих и регулирующих приборов. Мембранные манометры находят применение для измерения давления агрессивных сред. Материал мембраны - тонкая пластина из нержавеющей стали, для некоторых агрессивных сред - покрытая кислотостойкой резиной или фторопластом-40.

Основная приведенная погрешность пружинных манометров составляет 1 или 2,5%.

Корпуса манометров, применяемых для измерения давления кислорода, окрашиваются в голубой цвет: эти приборы перед установкой должны пройти обезжиривание, так как попадание масла в среду кислорода взрывоопасно.

В настоящее время заводом "Элемер" выпускаются приборы типа "Сапфир", имеющие более высокую точность, надежность и стандартизованные выходные сигналы (0-5 мА, 4-20 мА, 0-5 В). Принцип устройства приборов "Сапфир" изображен на рисунке 2.16.

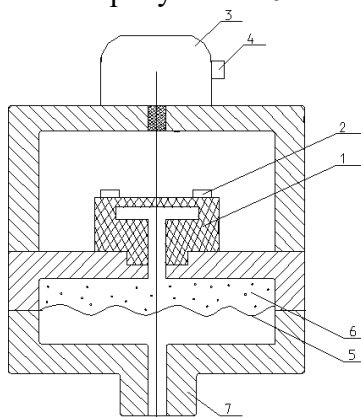


Рис. 2.16. Принцип устройства приборов "Сапфир"

1. Измерительный элемент.
2. Тензодатчики.
3. Электронный блок.
4. Разъем.
5. "Вялая" мембрана.
6. Кремнийорганическая жидкость.
7. Ниппель.

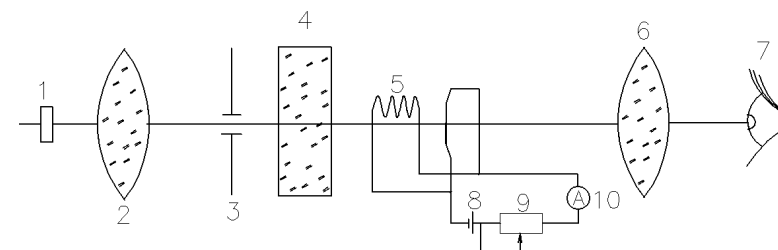


Рисунок 2.14 - Принципиальная схема пирометра "Проминь".  
 1. НТ. 2. Объектив. 3. Диафрагма. 4. Светофильтр. 5. Нить лампы накаливания. 6. Окуляр. 7. Глаз. 8. Источник питания. 9. Реостат. 10. Измерительный прибор.

Измерение проводится следующим образом: оператор, глядя в окуляр 6, наводит пирометр на НТ и, регулируя реостатом 9 силу тока нагрева нити лампы накаливания 5, добивается исчезновения контура нити на фоне нагретого тела. Температура определяется по значению силы тока накаливания лампы. Шкала прибора 10 проградуирована в °С.

Диапазоны измерения температуры пирометром "Проминь" такие: 800-1400, 1200-2000, 1800-4000 °С. Основная приведенная погрешность пирометра 1%, методическая погрешность от 40 °С на первом диапазоне и до 150 °С на диапазоне до 4000 °С.

#### 2.2.5.4. Пирометры спектрального отношения

Этот вид пирометров называют также цветовыми пирометрами. Температура определяется по отношению интенсивностей излучений на двух близко лежащих длинах волн излучения. Показания этих приборов при измерениях различных материалов практически совпадают. Важным достоинством цветовых пирометров также является то, что на их показания не влияют пыль, дым, размеры контролируемого объекта.

Серийно выпускаются цветовые пирометры типов "Спектропир-1", "Спектропир-2", ..., "Спектропир=10", "Веселка" и др.

Пирометр "Спектропир-10" применяется для измерения температуры до 3000 °С. В качестве чувствительных элементов в этом приборе применены два германиевых фотодиода, воспринимающих инфракрасное излучение с длиной волн 0,82 мкм и 1,5 мкм. Основная приведенная погрешность прибора не превышает 1%, дополнительная методическая погрешность за счет неполноты излучения составляет 10-20 °С. Показатель визирования для этого пирометра 1/500, откуда следует, что на расстоянии 1 метра можно измерять температуру тела, имеющего размеры 2 мм. Пирометр "Веселка" имеет унифицированные выходы

0-5 мА, 4-20 мА и 0-10 В, что позволяет их использовать в микропроцессорных системах автоматизации. Он применяется как при измерении низких температур (до 200 °С, с фотодиодами на 2,65 и 3,05 мкм) и для температур до 3000 °С, с фотодиодами на 0,44 и 0,68 мкм.

Основная приведенная погрешность прибора составляет 0,6%, быстродействие 0,05 сек.

## **Глава 2.3. Измерение давления и разрежения**

### **2.3.1. Единицы давлений**

Основной единицей давления в системе СИ является Паскаль (Па). Паскаль - относительно малое давление. Па = Н/м<sup>2</sup>, что равноценно давлению столба воды высотой в 0,1 мм. Поэтому в условиях производства при измерении давления и разрежения применяются и другие единицы: кг/см<sup>2</sup>, кг/м<sup>2</sup>, мм. в. ст., МПа, кПа.

Необходимо знать соотношение между этими единицами: 1 МПа = 10<sup>6</sup> Па, 1 кПа = 10<sup>3</sup> Па; 1 кг/см<sup>2</sup> = 10<sup>5</sup> Па = 100 кПа = 0,1 МПа, 1 кПа = 100 мм в. ст.; 1 кг/м<sup>2</sup> = 1 мм в.

ст.

### 2.3.2. Приборы для измерения давлений

неагрессивных сред

Приборы для измерения давления называются манометрами, приборы для измерения разрежения - вакуумметрами; приборы, измеряющие и давление, и разрежение - мановакуумметрами.

В зависимости от вида чувствительного элемента манометры бывают: трубчатые, сильфонные и мембранные. Наиболее распространены в промышленности пружинные трубчатые манометры (рис. 2.15).

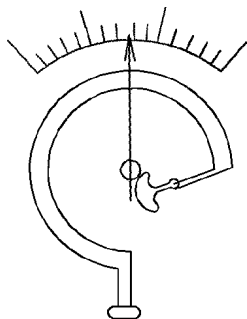


Рис. 2.15 Схема трубчатого манометра

Упругий элемент трубчатого манометра представляет собой тонкостенную трубку овального сечения, изогнутую по окружности. С одного конца к трубке припаян ниппель с резьбой для подсоединения манометра к измеряемому объекту, другой конец трубки через зубчатый или рычажный передаточный механизм связан со стрелкой прибора. При подаче внутрь трубки давления она как бы "раздувается", т.е. увеличивается малая ось овала. При этом трубка несколько распрямляется (увеличивается диаметр окружности), и ее свободный конец перемещает стрелку прибора на угол, пропорциональный давлению.

К материалу трубки предъявляется требование по сохранению стабильности ее упругих свойств во времени. Для измерения давления химически