

**Министерство образования и науки РФ
Федеральное агентство по образованию
Ангарская государственная техническая академия**

Чистофорова Н.В., Колмогоров А.Г.

Технические измерения и приборы

Часть 1. Измерение теплоэнергетических параметров

Учебное пособие

2008г

Технические измерения и приборы. Часть 1. Измерение теплоэнергетических параметров: Учебное пособие для студентов дневной и заочной формы обучения специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств»/ Н.В. Чистофорова, А.Г.Колмогоров. – Ангарск, АГТА, 2008. – 200 с.

Учебное пособие предназначено для изучения принципа действия и устройства приборов контроля основных теплоэнергетических параметров химико-технологических процессов: температуры, расхода, давления и уровня.

Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом АГТА

Р е ц е н з е н т ы:

к-т техн. наук, доцент кафедры АПП ИрГТУ ***С.И. Половнева;***

к-т техн. наук, доцент кафедры ПЭиИИТ АГТА ***Т.С. Воронова***

© Н.В. Чистофорова, А.Г.Колмогоров, 2008

© Кафедра автоматизации технологических процессов, 2008

© Ангарская государственная техническая академия, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	6
Введение.....	7
1. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.	8
1.1. Основные понятия об измерениях	8
1.2. Средства измерений	11
1.3. Метрологические характеристики средств измерений	17
1.4. Погрешности средств измерений.....	20
1.5. Информационно-измерительные системы.....	24
1.6. Метрологическое обеспечение технических измерений	31
2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	36
2.1. Основные понятия.....	36
2.2. Температурные шкалы.....	36
2.3. Классификация средств измерения температуры	39
2.4. Термометры расширения.....	41
2.4.1. Жидкостные термометры	41
2.4.2. Дилатометрические термометры	43
2.4.3. Биметаллические термометры	43
2.5. Манометрические термометры.....	44
2.5.1. Газовые манометрические термометры	46
2.5.2. Жидкостные манометрические термометры	47
2.5.3. Конденсационные манометрические термометры.....	48
2.6. Термоэлектрические термометры.....	49
2.6.1. Основные понятия и определения	49
2.6.2. Принцип действия	49
2.6.3. Включение измерительного прибора в цепь термопары.....	51
2.6.4. Удлиняющие (компенсационные) термоэлектродные провода	53
2.6.5. Поправка на температуру свободных концов термопары.....	55
2.6.6. Термоэлектродные материалы и типы термопар	57
2.6.7. Конструкция термопары	61
2.6.8. Основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар	64
2.6.9. Средства измерения сигналов термопар	66
2.7. Термопреобразователи сопротивления.....	76
2.7.1. Принцип действия	76
2.7.2. Типы термопреобразователей сопротивления	77
2.7.3. Конструкция термопреобразователей сопротивления	79

2.7.4. Вторичные приборы, работающие в комплекте с термопреобразователями сопротивления	81
2.8. Бесконтактные методы измерения температуры	91
2.8.1. Пирометры частичного излучения	93
2.8.2. Пирометры спектрального отношения (цветовые)	95
2.8.3. Пирометры полного излучения (радиационные)	96
2.8.4. Тепловизоры	98
3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ	102
3.1. Основные понятия.....	102
3.2. Виды измеряемых давлений.....	102
3.3. Системные и внесистемные единицы измерения давления	103
3.4. Классификация средств измерения давления	106
3.5. Жидкостные манометры	110
3.6. Деформационные датчики давления.....	112
3.7. Электрические датчики давления	117
3.7.1. Емкостные преобразователи давления.....	118
3.7.2. Пьезоэлектрические преобразователи давления	119
3.7.3. Тензорезисторные преобразователи давления	121
3.8. Грузопоршневой манометр	125
4. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА	127
4.1. Основные понятия, единицы измерения	127
4.2. Измерение количества жидкости и газа.....	128
4.2.1. Скоростные счетчики для жидкостей	128
4.2.2. Объемные счетчики для жидкостей	130
4.2.3. Барабанные счетчики для газов	132
4.2.4. Ротационные счётчики для газов	133
4.2.5. Насосы - дозаторы	134
4.3. Измерение расхода жидкости и газа	134
4.3.1. Расходомеры переменного перепада давления	134
4.3.2. Расходомеры постоянного перепада давления.....	144
4.3.3. Электромагнитные расходомеры.....	146
4.3.4. Ультразвуковые расходомеры	150
4.3.5. Расходомеры Кориолиса.....	151
4.3.6. Вихревые и вихреакустические расходомеры.....	154
4.3.7. Калориметрические расходомеры	158
5. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ	162
5.1. Основные понятия.....	162
5.2. Классификация приборов для измерения уровня	162

5.3. Уровнемеры непрерывного действия.....	163
5.3.1. Визуальные уровнемеры.....	163
5.3.2. Поплавковые уровнемеры	164
5.3.3. Буйковые уровнемеры	165
5.3.4. Гидростатические уровнемеры	167
5.3.5. Электрические уровнемеры.....	172
5.3.6. Радиоизотопные уровнемеры.....	174
5.3.7. Ультразвуковые уровнемеры	175
5.3.8. Радарные уровнемеры.....	177
5.3.9. Волноводные уровнемеры	182
5.4. Сигнализаторы уровня.....	185
5.4.1. Поплавковые сигнализаторы уровня.....	186
5.4.2. Вибрационные сигнализаторы уровня	188
5.4.3. Кондуктометрические сигнализаторы уровня	189
5.4.4. Ёмкостные сигнализаторы уровня.....	190
5.4.5. Магнитные сигнализаторы уровня	191
ПРИЛОЖЕНИЯ	193
Приложение 1.....	193
Приложение 2.....	194
Приложение 3.....	195
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	196

ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание предлагаемого учебного пособия основано на программе дисциплины «Технические измерения и приборы», изучаемой студентами по специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)». В данном пособии охватывается тематика первого из двух семестров, отведенного для освоения программы данной учебной дисциплины.

В главе 1 кратко изложены основные понятия метрологии, приведены общепринятые классификации методов, средств и погрешностей измерений, рассмотрены общие принципы построения и классификация информационно-измерительных систем. В главе 2 представлены основные контактные и бесконтактные методы и средства для измерения температуры. В 3 главе содержатся основные методы и средства измерения давления. Глава 4 посвящена изучению классических и современных методов и средств для измерения количества и расхода жидкостей и газов. Глава 5 посвящена изучению методов и средств контроля уровня жидкостей и сыпучих материалов. В данной главе рассматриваются приборы как для непрерывного слежения за уровнем, так и для его сигнализации о выходе за предельные значения.

Внутри каждой главы приборы классифицированы по методам измерения, назначению и конструктивным особенностям. Каждая глава сопровождается контрольными вопросами для самопроверки.

В приложениях приведены градуировочные таблицы наиболее распространенных типов термометров сопротивления и термопар, которые могут быть полезны при решении задач и выполнении лабораторных работ.

ВВЕДЕНИЕ

В практической жизни человек всюду имеет дело с измерениями. Измерения являются одним из важнейших путей познания природы человеком. Они дают количественную характеристику окружающего мира, открывая человеку действующие в природе закономерности. Математика, механика, физика стали именоваться точными науками потому, что благодаря измерениям они получили возможность устанавливать точные количественные соотношения, выражающие объективные законы природы.

Все отрасли техники не могли бы существовать без развернутой системы измерений, определяющих как все технологические процессы, контроль и управление ими, так и свойства и качество выпускаемой продукции.

Высокопроизводительная, экономичная и безопасная работа технологических процессов требует применения современных методов и средств измерения величин, характеризующих ход производственного процесса и состояние оборудования. Автоматический контроль является логически первой ступенью автоматизации, без успешного функционирования которых невозможно создание эффективных АСУ ТП.

В современной технике для решения задач автоматического контроля все шире применяют полупроводники, лазеры, микропроцессорные контроллеры. Фирмы-производители измерительной техники постоянно находятся в поиске новых технологий, направленных на улучшение характеристик приборов, повышение показателей надежности.

Данное пособие поможет разобраться во всем многообразии измерительной техники, предназначенной для контроля за основными теплоэнергетическими параметрами химико-технологических процессов: температурой, расходом, давлением и уровнем.

1. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Основные понятия об измерениях

В общем случае **измерением**¹ называется совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Число, выражающее отношение измеряемой величины к единице измерения, называется числовым значением измеряемой величины. Если x – измеряемая величина, u – единица измерения, а q – числовое значение измеряемой величины, то

$$x = qu. \quad (1.1)$$

Правая часть соотношения (1.1) называется **результатом измерения**. Результат измерения – всегда размерная величина – состоит из единицы u , которая имеет свое наименование, и числа q , показывающего, сколько раз данная единица содержится в измеряемой величине.

Существует несколько видов измерений. При их классификации исходят из характера зависимости измеряемой величины от времени, вида уравнения измерений, условий определяющих точность результата измерений и способа выражения этих результатов.

По *характеру зависимости измеряемой величины от времени* измерения подразделяются на:

- **статические измерения** – это измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной задачей за неизменную на протяжении времени измерения;
- **динамические измерения** – измерения изменяющейся по размеру физической величины.

По *способу получения результатов измерений* (виду уравнения измерений) их разделяют на:

- **прямые измерения** – измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно. При этом измеряемую вели-

¹ Все понятия и определения в этой главе даны согласно ГСИ РМГ 29-99 (переиздание - сентябрь 2003 г.) «Метрология. Основные термины и определения»

чину сравнивают с мерой измерительными приборами, градуированными в требуемых единицах;

- **косвенные измерения** – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной;
- **совокупные измерения** – проводимые одновременно измерения нескольких одноимённых величин, при которых искомое значение величины определяют путем решения системы уравнений, полученных при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. Примером совокупных измерений является определение массы отдельных гирь набора (калибровка по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь);
- **совместные измерения** – производимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для определения зависимости между ними. В качестве примера совместных измерений можно назвать измерение электрического сопротивления при 200°C и температурных коэффициентов измерительного резистора по данным прямых измерений его сопротивления при различных температурах.

По способу выражения результата измерений измерения делят на:

- **абсолютные измерения** – основаны на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и использовании значений физических констант;
- **относительные измерения** – измерения отношения величины к одноимённой величине, играющей роль единицы, или измерения величин по отношению к одноимённой величине, принимаемой за исходную.

По используемому методу измерения (совокупности приёмов использования принципов и средств измерений) измерения подразделяются на:

- **метод непосредственной оценки** – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений;

- **метод сравнения с мерой** – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод имеет следующие модификации:
 - а) **метод дополнения** – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению;
 - б) **дифференциальный метод измерений** – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, при котором измеряется разность между этими двумя величинами;
 - в) **нулевой метод** – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля;
 - г) **метод измерения замещением** – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.

Основными *характеристиками измерений* являются:

- **принцип измерений** – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений;
- **метод измерений** – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений;
- **методика измерений** – установленная совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение необходимых результатов измерений с гарантированной точностью в соответствии с принятым методом;
- **погрешность измерений** – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины;
- **вес измерений** – положительное число, служащее оценкой доверия к тому или иному отдельному результату измерений, входящему в ряд неравноточных измерений (обычно результату с большей погрешностью приписывают вес, равный единице, а остальные веса находят по отношению к нему);

- **сходимость измерений** – близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью;
- **воспроизводимость измерений** – близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, разными средствами измерений, разными операторами, в разное время, но приведенные к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.).

1.2. Средства измерений

Средство измерений (СИ) – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным в пределах установленной погрешности в течение известного интервала времени.

По конструктивному исполнению СИ подразделяются на:

- **мера** – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. В качестве примера можно привести: нормальный элемент – мера ЭДС, кварцевый генератор – мера частоты электрических колебаний и т.д. Меры подразделяют на однозначные, многозначные, наборы мер, магазины мер, установочные;
- **измерительный прибор** – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Измерительный прибор, как правило, содержит устройство для преобразования измеряемой величины в сигнал измерительной информации и его индикации в форме, наиболее доступной для наблюдателя. По степени индикации значений измеряемой величины измерительные приборы разделяются на показывающие и регистрирующие. Различают приборы прямого действия и приборы сравнения;
- **измерительное устройство** – часть измерительного прибора (установки или системы), связанная с измерительным сигналом и имеющая обособленную конструкцию и назначение. Измери-

тельным устройством может быть названо регистрирующее устройство измерительного прибора (включающее ленту для записи, лентопротяжный механизм и пишущий элемент);

- **измерительный преобразователь** – техническое средство, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или сигнал измерительной информации, удобной для обработки, хранения, дальнейшего преобразования, индикации или передачи и имеющее нормированные метрологические характеристики. Измерительный преобразователь (ИП) или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.) или же применяется с каким-либо средством измерения. По характеру преобразования различают: аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые преобразователи. По месту в измерительной цепи различают:

а) **первичный измерительный преобразователь** – измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора (установки, системы). Конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он "дает" информацию) называется **датчиком**;

б) **передающий измерительный преобразователь** – измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации;

в) **масштабный измерительный преобразователь** – измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера величины в заданное число раз;

- **измерительная установка** – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенных для измерения одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте. Измерительную установку с включенным в нее образцовым средством измерений и применяемую для поверки называют поверочной установкой. Измерительную установку, входящую в состав эталона, называют эталонной установкой. Измерительную установку, предназначенную для испытаний каких-либо изделий называют испытательным стендом;

- **измерительная система** – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства (среды, объекта и т. п.) с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому пространству (объекту, среде и т.п.).

По уровню автоматизации СИ подразделяются на:

- **неавтоматическое средство измерений** – средство измерений, не имеющее устройств для автоматического выполнения измерений и обработки их результатов;
- **автоматизированное средство измерений** – средство измерений, производящее в автоматическом режиме одну или часть измерительных операций;
- **автоматическое средство измерений** – средство измерений, производящее в автоматическом режиме измерения и все операции, связанные с обработкой результатов измерений, их регистрацией, передачей данных или выработкой управляющего сигнала.

По метрологическому назначению СИ подразделяются на:

- **рабочее средство измерений** – средство измерений, предназначенное для измерений не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерения. К ним относятся средства измерений, применяемые в научных целях, при контроле параметров продукции и технологических процессов, в астрономии, в геодезии и т. п.;
- **метрологическое средство измерений** – средство измерений, предназначенное для метрологических целей: воспроизведение единицы и (или) ее хранение или передача размера единицы рабочим средствам измерений. К ним относят эталоны, образцовые средства измерений, поверочные установки, средства сравнения (компараторы), стандартные образцы.

По отношению к измеряемой физической величине различают:

- **основное средство измерений** – средство измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей;

- **вспомогательное средство измерений** – средство измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учесть для получения результатов измерений требуемой точности.

С целью систематизации и рационального подхода к разработке и использованию технических средств автоматизации для всего многообразия процессов и производств была построена **Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП)**, в основу которой положены определенные системотехнические принципы.

Основные схематические принципы построения ГСП:

- разделение приборов по функциональному признаку;
- минимизация номенклатуры на основе создания параметрических рядов, унифицированных систем и агрегатированных комплексов;
- блочно-модульный принцип построения приборов на основе типовых блоков и модулей;
- совместимость приборов и устройств ГСП на основе:
 - а) унификации сигналов связи между электрическими, пневматическими и гидравлическими приборами;
 - б) унификации конструктивов и присоединительных размеров;
 - в) унификации технических и эксплуатационных требований.

По *функциональному признаку* изделия ГСП разделяются на следующие группы:

1. Устройства получения информации о состоянии процесса – первичные технические преобразователи (датчики).
2. Устройства приема, преобразования и передачи информации по каналам связи. Объединяют в себе коммутаторы измерительных цепей, преобразователи сигналов и кодов, телемеханические устройства измерения, сигнализации и управления.
3. Устройства обработки, хранения и представления информации и устройства формирования команд управления. В эту группу входят анализаторы сигналов, функциональные и операционные преобразователи, логические устройства, регуляторы, задатчики, управляющие вычислительные устройства и комплексы.

4. Устройства использования командной информации на объекте управления - исполнительные механизмы, усилители мощности.

С точки зрения выполняемой функции **устройства первой группы** – датчики не являются сложными: они преобразуют измеряемый параметр в удобный для передачи и обработки сигнал. С точки зрения принципа действия и конструктивного исполнения устройства этой группы являются весьма сложными. Они устанавливаются на объекте и непосредственно взаимодействуют с регулируемым параметром или контролируемой средой. Вид измеряемого параметра, условия монтажа и эксплуатации резко ограничивают возможности унификации датчиков. Для измерения одного параметра в зависимости от требуемых технических характеристик и условий эксплуатации применяется большое количество различных типов датчиков (например, более шестидесяти типов датчиков давления, более пятидесяти типов датчиков перепада давления и т.д.).

Номенклатура средств получения информации о технологических параметрах процесса может быть разбита на следующие основные группы:

- средства измерения теплотехнических параметров – температуры, давления, перепада давления, уровня, расхода;
- средства измерения геометрических размеров, перемещений, усилий и деформаций;
- средства определения состава и свойств веществ;
- средства измерения массы и дозирующая техника;
- средства неразрушающего контроля качества продукции.

Устройства **второй функциональной группы** можно разделить на две подгруппы:

- нормирующие и межсистемные преобразователи;
- устройства для телемеханической передачи информации.

Нормирующие преобразователи предназначены для усиления и масштабирования (нормирования) сигналов, межсистемные преобразователи предназначены для преобразования вида сигнала или вида энергии сигнала. Эти преобразователи позволяют осуществить дистанционную передачу сигналов на расстояние до трех километров, и предназначены для управления объектами с сосредоточенными параметрами. Для управления объектами с распределенными (рассредоточенными) параметрами применяются телемеханические системы передачи информации. В этих системах ис-

пользуются радиоканалы, линии связи и линии электропередач с уплотнением и поочередной передачей данных по одному каналу.

Устройства третьей группы предназначены для формальной и содержательной обработки информации и формирования управляющих воздействий. Сюда входят показывающие и регистрирующие приборы, регуляторы, блоки арифметических и логических преобразований, электронные вычислительные машины, универсальные и специализированные контроллеры. С объектом устройства этой группы не взаимодействуют непосредственно и воспринимают входные унифицированные сигналы, количество которых ограничено ГОСТами. В функциональном отношении эта группа является самой сложной, поскольку именно данные средства реализуют все алгоритмы регулирования и управления от простейших режимов стабилизации параметра до автоматизации управления крупными и сложными предприятиями. Поскольку устройства этой группы непосредственно с объектом не связаны и оперируют с абстрактными моделями, им присуща универсальность использования и высокая степень унификации.

Устройства четвертой группы – исполнительные устройства, как и датчики с точки зрения выполняемой функции весьма просты и непосредственно взаимодействуют с объектом. Однако от них не требуется такой высокой точности и разнообразия параметров, как от датчиков. Кроме того, исполнительные устройства, как правило, состоят из исполнительного механизма и регулирующего органа. Часто регулирующие органы являются составной частью основного технологического оборудования и поставляются вместе с ним.

По роду используемой энергии изделия ГСП делятся на:

- электрические;
- пневматические;
- гидравлические.

В ГСП входят также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии (приборы и регуляторы прямого действия).

В АСУ сложными технологическими процессами применяются, как правило, приборы всех трех ветвей. Связь электрических, пневматических и гидравлических приборов осуществляются с помощью преобразователей сигналов.

1.3. Метрологические характеристики средств измерений

Все средства измерений имеют общие свойства, позволяющие сопоставлять их между собой: метрологические, эксплуатационные, информационные и др. Отдельные виды и типы СИ обладают своими специфическими свойствами, которые отражаются в соответствующих нормативно-технических документах. Поэтому важно уметь выделять и оценивать составляющую погрешности, вносимую используемыми средствами измерений по их метрологическим характеристикам.

Метрологическая характеристика средства измерений – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат и погрешность его измерений. Для каждого типа СИ устанавливают свои метрологические характеристики. Метрологические характеристики, устанавливаемые нормативно-техническими документами, называют *нормируемыми метрологическими характеристиками*, а определяемые экспериментально – *действительными метрологическими характеристиками*.

К метрологическим характеристикам относятся градуировочная характеристика, погрешность средства измерений, чувствительность, цена деления шкалы, порог чувствительности, диапазон измерений, вариация показаний и др. От того, насколько они точно будут выдержаны при изготовлении и стабильны при эксплуатации, зависит точность результатов, получаемая с помощью СИ.

Градуировочная характеристика СИ – зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально. Градуированная характеристика может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы.

Погрешность СИ – важнейшая метрологическая характеристика, определяемая как разность между показанием СИ и истинным (действительным) значением измеряемой величины. Для меры показанием является ее номинальное значение.

Чувствительность СИ – свойство СИ, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины. Различают абсолютную и относительную чувствительность. Абсолютную чувствительность определяют по формуле

$$S = \Delta y / \Delta x, \quad (1.2)$$

относительную чувствительность – по формуле

$$S_{\text{отн}} = \Delta y / (\Delta x / x),$$

где Δy – изменение сигнала на выходе; Δx – изменение измеряемой величины, x – измеряемая величина.

При нелинейной статической характеристике преобразования чувствительность зависит от x , при линейной характеристике она постоянна.

У измерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная, т. е. расстояние между соседними делениями шкалы одинаковое.

Цена деления шкалы (постоянная прибора) – разность значения величины, соответствующая двум соседним отметкам шкалы СИ. Приборы с равномерной шкалой имеют постоянную цену деления. В приборах с неравномерной шкалой цена деления может быть разной на разных участках шкалы, и в этом случае нормируется минимальная цена деления. Цена деления шкалы равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы прибора, и может быть также определена через абсолютную чувствительность:

$$C=1/S. \quad (1.3)$$

Порог чувствительности – наименьшее значение изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством. Порог чувствительности выражают в единицах входной величины.

Диапазон измерений – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИ. Значения величины, ограничивающие диапазон измерений снизу и сверху (слева и справа), называют соответственно *нижним* и *верхним* пределом измерений. С целью повышения точности измерений диапазон измерений СИ можно разбить на несколько поддиапазонов. При переходе с одного поддиапазона на другой некоторые составляющие основной погрешности уменьшаются, что приводит к повышению точности измерений. При нормировании погрешности допускают для каждого поддиапазона свои предельные значения погрешности. Область значений шкалы прибора, ограниченную начальными и конечными значениями шкалы, называют **диапазоном показаний**.

Вариация показаний – наибольшая вариация выходного сигнала прибора при неизменных внешних условиях. Она является следствием трения и люфтов в узлах приборов, механического и магнитного гистерезиса элементов и др.

Вариация выходного сигнала – это разность между значениями выходного сигнала, соответствующими одному и тому же действительному значению входной величины при медленном подходе слева и справа к выбранному значению входной величины.

Динамические характеристики, т.е. характеристики инерционных свойств (элементов) измерительного устройства, определяющие зависимость выходного сигнала СИ от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала, внешних влияющих величин, нагрузки. К ним относят дифференциальное уравнение, описывающее работу средства измерений; переходную и импульсную переходную функции, амплитудные и фазовые характеристики, передаточную функцию.

Динамические свойства средства измерений определяют динамическую погрешность. ***Динамическая погрешность средства измерений*** – погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины.

Нормируемые метрологические характеристики – совокупность метрологических характеристик данного типа средств измерений, устанавливаемая нормативными документами на средства измерений. Нормируемые метрологические характеристики, включаемые в этот комплекс, должны отражать реальные свойства СИ, и их номенклатура должна быть достаточной для оценки инструментальной составляющей погрешности измерений в рабочих условиях применения СИ с той степенью достоверности, которая требуется для решения поставленной измерительной задачи. Общий перечень нормируемых метрологических характеристик СИ, формы их представления и способы нормирования устанавливаются ГОСТом. В него могут входить:

- пределы измерений, пределы шкалы;
- цена деления равномерной шкалы аналогового прибора или многозначной меры, при неравномерной шкале – минимальная цена деления;
- выходной код, число разрядов кода, номинальная цена единицы наименьшего разряда цифровых СИ;
- номинальное значение однозначной меры;
- градуировочная характеристика;
- погрешность СИ;

- вариация показаний прибора или выходного сигнала преобразователя;
- полное входное сопротивление измерительного устройства, полное выходное сопротивление измерительного преобразователя или меры;
- неинформативные параметры выходного сигнала измерительного преобразователя или меры;
- динамические характеристики СИ; функции влияния.

Кроме метрологических характеристик при эксплуатации средств измерений важны и неметрологические характеристики: показатели надежности, электрическая прочность, сопротивление изоляции, устойчивость к климатическим и механическим воздействиям, время установления рабочего режима и др.

Надежность средства измерений – это способность СИ сохранять нормированные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Основными критериями надежности приборов являются вероятность и средняя продолжительность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы определяется вероятностью отсутствия отказов прибора в течение определенного промежутка времени.

Средняя продолжительность – отношение времени работы прибора к числу отказов за это время.

1.4. Погрешности средств измерений

Процедура измерения состоит из следующих этапов: принятие модели объекта измерения, выбор метода измерения, выбор СИ, проведение эксперимента для получения результата. Это приводит к тому, что результат измерения отличается от истинного значения измеряемой величины на некоторую величину, называемую *погрешностью измерения*. Измерение можно считать законченным, если определена измеряемая величина и указана возможная степень ее отклонения от истинного значения.

Причины возникновения погрешностей чрезвычайно многочисленны, поэтому классификация погрешностей, как и всякая другая классификация, носит достаточно условный характер.

Следует различать погрешность СИ и погрешность результата измерения этим же СИ. Погрешности измерений зависят от метрологических характеристик используемых СИ, совершенства выбранного метода измерений, внешних условий, а также от свойств объекта измерения и изме-

ряемой величины. Погрешности измерений обычно превышают погрешности используемых СИ, однако, используя специальные методы устранения ряда погрешностей и статистическую обработку данных многократных наблюдений, можно в некоторых случаях получить погрешность измерения меньше погрешности используемых СИ.

По *характеру проявления* погрешности СИ делятся на:

- **систематическая погрешность** – составляющая погрешности СИ, принимаемая постоянной или закономерно изменяющейся. К систематическим погрешностям СИ относят методические, инструментальные, субъективные и другие погрешности, которые при проведении измерений необходимо учитывать и по возможности устранять;
- **случайная погрешность** – составляющая погрешности СИ, изменяющаяся случайным образом. Она приводит к неоднозначности показаний и обусловлена причинами, которые нельзя точно предсказать и учесть. Однако при проведении некоторого числа повторных опытов теория вероятности и математическая статистика позволяют уточнить результат измерения, т. е. найти значение измеряемой величины, более близкое к действительному значению, чем результат одного измерения;
- **промахи** – грубые погрешности, связанные с ошибками оператора или неучтенными внешними воздействиями. Их обычно исключают из результатов измерений.

По *причинам возникновения* погрешности СИ делятся на:

- **методические** – погрешности, возникающие вследствие несовершенства, неполноты теоретических обоснований принятого метода измерения, использования упрощающих предположений и допущений при выводе применяемых формул, из-за неправильного выбора измеряемых величин. Например, измерение температуры с помощью термопары может содержать методическую погрешность, вызванную нарушением температурного режима исследуемого объекта (вследствие внесения термопары);
- **инструментальные** – погрешности, обусловленные свойствами применяемых СИ (стабильностью, чувствительностью к внешним воздействиям и т.д.), их влиянием на объект измерений, техноло-

гией и качеством изготовления (например, неточность градуировки, конструктивные несовершенства);

- **субъективные** – погрешности, вызванные состоянием оператора, проводящего измерения, его положением во время работы, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами СИ – все это сказывается на точности визирования. Использование цифровых приборов и автоматических методов измерения позволяет исключить такого рода погрешности.

По отношению к изменяемости измеряемой величины погрешности СИ делятся на:

- **статическая погрешность** – погрешность СИ, используемого при измерениях постоянной величины;
- **динамическая погрешность** – погрешность СИ, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерения) физической величины.

По способу выражения погрешности СИ делятся на:

- **абсолютная погрешность** – разность между показаниями прибора и действительным значением измеряемой величины:

$$\Delta = x - x_0, \quad (1.4)$$

где x – показания прибора; x_0 – действительное значение измеряемой величины;

- **относительная погрешность** – погрешность СИ, выраженная отношением абсолютной погрешности СИ к действительному значению измеренной физической величины в пределах диапазона измерений:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \cdot 100 \%, \quad (1.5)$$

Так как $x \gg \Delta$, то вместо действительного значения измеряемой величины можно использовать показания прибора;

- **приведённая погрешность** – относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности СИ к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона. Условно принятое значение величины называют нормирующим значением $x_{\text{норм}}$. Приведенная погрешность равна:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_{\text{норм}}} \cdot 100 \% . \quad (1.6)$$

Выбор нормирующего значения производится в соответствии с ГОСТ 8.009-84. Это может быть верхний предел измерений СИ, диапазон измерений, длина шкалы и т.д. Для многих средств измерений по приведенной погрешности устанавливают класс точности прибора.

По *характеру зависимости от измеряемой величины* погрешности СИ делятся на:

- **аддитивная погрешность** – это погрешность, постоянная для каждого значения измеряемой величины, вызванная поступательным смещением реальной статической характеристики (функции преобразования) от идеальной статической характеристики;
- **мультипликативная погрешность** – это погрешность, линейно возрастающая или убывающая с ростом измеряемой величины, вызванная поворотом реальной статической характеристики (функции преобразования) от идеальной статической характеристики.

По *отношению к условиям применения* погрешности СИ делятся на:

- **основная погрешность** – погрешность СИ, определяемая в нормальных условиях его применения. Например, если для прибора установлены нормальные температурные условия $+10...+35^{\circ}\text{C}$, то в этом диапазоне гарантируется основная погрешность, указанная в паспорте. Прибор может работать в более широком диапазоне температур от 0 до $+40^{\circ}\text{C}$. Этот диапазон называют рабочим;
- **дополнительная погрешность** – составляющая погрешности СИ, дополнительно возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

Предел допускаемой основной погрешности – наибольшая основная погрешность, при которой СИ может быть признано годным и допущено к применению по техническим условиям.

Предел допускаемой дополнительной погрешности – это та наибольшая дополнительная погрешность, при которой средство измерения может быть допущено к применению. Например, для прибора класса точности 1,0 приведенная дополнительная погрешность при изменении температуры на 10°C не должна превышать $\pm 1\%$. Это означает, что при изме-

нении температуры среды на каждые 10°C добавляется дополнительная погрешность 1%.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей выражают в форме абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

Обобщенная характеристика данного типа средств измерений, как правило, отражающая уровень их точности, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность, называется **классом точности СИ**. Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ одного типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств, так как погрешность зависит также от метода измерений, условий измерений и т.д. Это важно учитывать при выборе СИ в зависимости от заданной точности измерений. Класс точности СИ конкретного типа устанавливают в стандартах технических требований (условий) или в других нормативных документах. Например, прибор класса 0,5 может иметь основную приведенную погрешность, не превышающую 0,5%. Вместе с тем, прибор должен удовлетворять соответствующим требованиям и в отношении допускаемых дополнительных погрешностей.

1.5. Информационно-измерительные системы

Информационно-измерительная система (ИИС) – совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки с целью представления потребителю (в том числе ввода в АСУ) в требуемом виде либо автоматического осуществления логических функций измерения, контроля, диагностирования, идентификации (распознавание образов).

Любая ИИС обладает необходимыми функциональными возможностями, технические и другие характеристики в решающей степени определяются объектом исследования, для которого данная система создается.

Назначение ИИС можно определить как целенаправленное оптимальное ведение измерительного процесса и обеспечение смежных систем высшего уровня достоверной информацией. Исходя из этого, основные функции ИИС таковы: получение измерительной информации от объекта исследования, ее обработка, передача, представление информации опера-

тору и (или) ЭВМ, запоминание, отображение и формирование управляющих воздействий.

Степень достижения функций принято характеризовать с помощью критериев измерения. ИИС оптимизируют по многим частичным критериям, таким как точность, помехоустойчивость, надежность, пропускная способность, адаптивность, сложность, экономичность и др.

Состав и структура конкретной ИИС определяется общими техническими требованиями, установленными ГОСТом, и частными требованиями, содержащимися в техническом задании на ее создание.

ИИС должна управлять измерительным процессом или экспериментом в соответствии с принятым критерием функционирования; выполнять возложенные на нее функции в соответствии с назначением и целью; обладать требуемыми показателями и характеристиками точности, надежности и быстродействия; отвечать экономическим требованиям, предъявляемым к способам и форме представления информации, размещения технических средств; быть приспособленной к функционированию с ИИС смежных уровней иерархии, т.е. обладать свойствами технической, информационной и метрологической совместимости; допускать возможность дальнейшей модернизации и развития и др.

Упрощенная схема взаимодействия основных компонентов ИИС представлена на рис. 1.1.

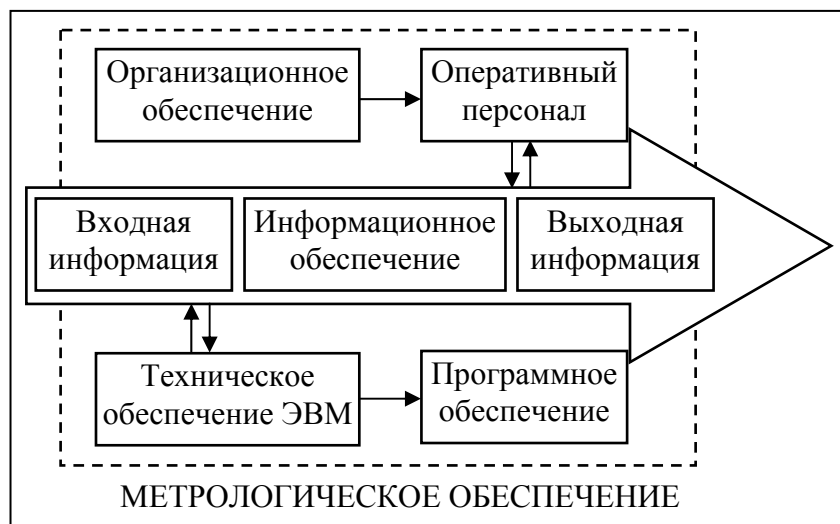


Рис.1.1. Основные компоненты информационно-измерительных систем

Процессом функционирования ИИС (как и любой другой технической системы) является целенаправленное преобразование входной информации в выходную. Это преобразование выполняется либо автоматиче-

ски комплексом технических средств (техническим обеспечением), либо совместно-оперативным персоналом и КТС в сложных ИИС, измерительно-управляющих системах. Чтобы люди и комплекс технических средств могли функционировать оптимально, необходимы соответствующие инструкции и правила. Эту задачу выполняет организационное обеспечение.

Математическое, программное и информационное обеспечение входит в состав только ИИС с цифровым вычислительным комплексом.

- **Математическое обеспечение** – это модели и вычислительные алгоритмы.
- **Программное обеспечение** гарантирует конкретную реализацию вычислительных алгоритмов и алгоритмов функционирования системы, охватывает круг решений, связанных с разработкой и эксплуатацией программ.
- **Информационное обеспечение** определяет способы и конкретные формы информационного отображения состояния объекта исследования в виде документов, диаграмм, графиков, сигналов для их представления обслуживающему персоналу и ЭВМ для дальнейшего использования в управлении.

Всю систему в целом охватывает метрологическое обеспечение.

Технические средства ИИС состоят из следующих блоков:

- 1) множества первичных измерительных преобразователей (датчиков);
- 2) множества вторичных измерительных преобразователей;
- 3) множества элементов сравнения – мер;
- 4) блока цифровых устройств;
- 5) множества элементов описания – норм;
- 6) множества преобразователей сигнала, средств отображения, памяти и др.

Блоки 1 – 6 используют в цифровых ИИС; блоки 1, 2, 3 и 6 – в аналоговых ИИС.

При наличии в составе ИИС ЭВМ информация к ЭВМ может поступать непосредственно от устройств обработки и (или) хранения.

Каждому конкретному виду ИИС присущи многочисленные особенности, определяемые узким назначением систем и их технологически-конструктивным исполнением. Ввиду многообразия видов ИИС до настоящего времени не существует общепринятой их классификации.

Наиболее распространенной является классификация ИИС *по функциональному назначению*. По этому признаку ИИС реализуются в виде: **измерительных систем (ИС); систем автоматического контроля (САК); систем технической диагностики (СТД); систем распознавания образов (идентификации) (СРО); телеизмерительных систем (ТИС).**

Собственно ИС используются для различного рода комплексных исследований научного характера. Они предназначены для работы с объектами, характеризующимися до начала эксперимента минимумом априорной информации. Цель создания таких систем заключается в получении максимального количества достоверной измерительной информации об объекте для составления алгоритмического описания его поведения.

Обратная связь системы с объектом отсутствует или носит вспомогательный характер. Информация, полученная на выходе ИС, может использоваться для принятия каких-либо решений, создания возмущающих воздействий, но не для управления объектом. ИС предназначена для создания дополнительных условий проведения эксперимента, для изучения реакции объекта на эти воздействия. Следовательно, использование информации не входит в функции ИС. Эта информация предоставляется человеку-оператору или поступает в средства автоматической обработки информации.

Для ИС характерны:

- более высокие по отношению к системам другого вида требования к метрологическим характеристикам;
- более широкий спектр измеряемых физических величин и в особенности их количество (число измерительных каналов);
- необходимость в средствах представления информации - это связано с тем, что основной массив информации с выхода систем передается человеку для принятия им решения об изменении условий проведения эксперимента, его продолжении или прекращении. Поэтому определяющим требованием является неискаженное, наглядное и оперативное представление текущей информации с учетом динамики ее обновления и быстродействия системы, обеспечивающее удобство восприятия и анализа человеком;
- большой объем внешней памяти для систем, в которых обработка и анализ результатов измерений выполняются после завершения

процесса эксперимента с помощью набора различных средств обработки и представления информации.

Классификация ИС по функциональному назначению представлена на рис. 1.2, где:

"А" - ИС для прямых измерений, т. е. независимых измерений дискретных значений непрерывных величин;

"Б" - статистические ИС, предназначенные для измерения статистических характеристик измеряемых величин;

"В" - системы, предназначенные для раздельного измерения зависимых величин.

Наиболее распространены системы для прямых измерений. Входными в ИС для прямых измерений являются величины, воспринимаемые датчиками или другими входными устройствами системы. Задача таких ИС заключается в выполнении аналого-цифровых преобразований множества величин и выдаче полученных результатов измерения.

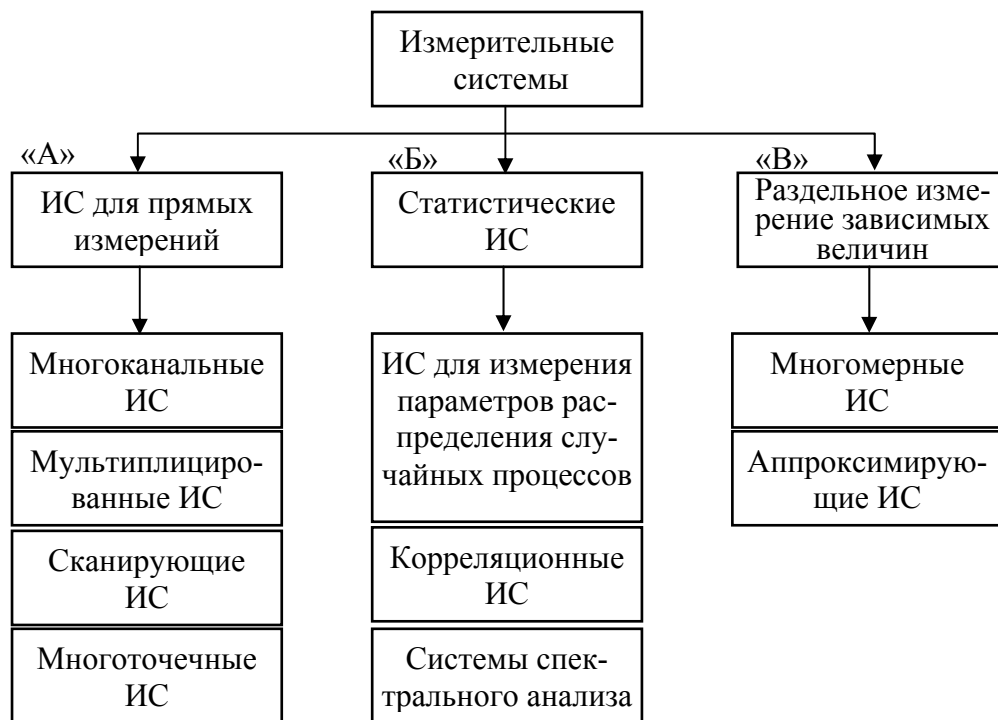


Рис. 1.2. Классификация ИС по функциональному назначению

В рассматриваемых ИС основные типы измеряемых входных величин могут быть сведены либо к множеству изменяющихся во времени t величин $\{x_i(t)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, либо к изменяющейся во времени и распределенной по пространству S непрерывной функции $x(t, S)$. При измерении непрерывная функция $x(t, S)$ представляется множеством дискрет $x(t_i, S_j)$, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, 3$.

Измерительные системы, производящие измерения дискрет функции $x(t, S)$, основаны на использовании многоканальных, многоточечных, мультиплицированных и сканирующих структур.

Многоканальные системы параллельного действия объединяются в один из самых распространенных классов измерительных систем параллельного действия, применяемых во всех отраслях народного хозяйства. Основные причины столь широкого распространения многоканальных ИС заключаются в возможности использования стандартных, относительно простых, измерительных приборов, в наиболее высокой схемной надежности таких систем, в возможности получения наибольшего быстродействия при одновременном получении результатов измерения, в возможности индивидуального подбора СИ к измеряемым величинам. Недостатки таких систем – сложность и большая стоимость по сравнению с другими системами.

Мультиплицированные (с общей образцовой величиной) ИС имеют меньшее число элементов, чем многоканальные параллельные ИС, но несколько меньшее быстродействие. В этих системах измерительная величина сравнивается с линейно изменяющейся величиной. При фиксированных моментах начала развертки и равенстве x и x_k может быть определен интервал времени t_x , пропорциональный значению x_k . В многоканальной системе возникают трудности в разделении сигналов от элементов сравнения. В этом случае прибегают к специальным мерам.

В сканирующих ИС (ИС последовательного действия) – операции получения информации выполняются последовательно во времени с помощью одного канала измерения. Если измеряемая величина распределена в пространстве или собственно координаты точки являются объектом измерения, то восприятие информации в таких системах выполняется с помощью одного сканирующего датчика. Сканирующие системы находят применение при расшифровке графиков в медицине, геофизике, метрологии, при промышленных испытаниях, во многих отраслях народного хозяйства и при научных исследованиях затрачивается значительное время на измерение параметров графических изображений и представление результатов измерения в цифровом виде. Сканирование может выполняться непосредственно воспринимающим элементом или сканирующим лучом при неподвижном воспринимающем элементе. Такими элементами могут быть оптико-механические или электронно-развертывающие устройства. Недостаток систем – малое быстродействие.

Многоточечные ИС (ИС последовательно-параллельного действия) применяют в сложных объектах с большим числом измеряемых параметров. В этих системах при множестве датчиков имеется всего один измерительный тракт и измерительный коммутатор. Недостаток систем – пониженное быстродействие и точность за счет использования ключей коммутаторов.

*По характеру взаимодействия системы с объектом исследования и обмена информацией между ними ИИС могут быть разделены на **активные** и **пассивные**.*

Пассивные системы только воспринимают информацию от объекта, а активные, действуя на объект через устройство внешних воздействий, позволяют автоматически и наиболее полно за короткое время изучить его поведение. Такие структуры широко применяются при автоматизации научных исследований различных объектов.

В зависимости от характера обмена информацией между объектами и активными ИИС различают ИС без обратной связи и с обратной связью по воздействию. Воздействие на объект может осуществляться по заранее установленной жесткой программе либо по программе, учитывающей реакцию объекта. В первом случае реакция объекта не влияет на характер воздействия, а следовательно, и на ход эксперимента. Его результаты могут быть выданы оператору после окончания. Во втором случае результаты реакции отражаются на характере воздействия, поэтому обработка ведется в реальном времени. Такие системы должны иметь развитую вычислительную сеть. Кроме того, необходимо оперативное представление информации оператору в форме, удобной для восприятия, с тем чтобы он мог вмешиваться в ход процесса.

Эффективность научных исследований, испытательных, поверочных работ, организации управления технологическими процессами с применением ИИС в значительной мере определяется методами обработки измерительной информации.

Операции обработки измерительной информации выполняются в устройствах, в качестве которых используются специализированные либо универсальные ЭВМ. В некоторых случаях функции обработки результатов измерения могут осуществляться непосредственно в измерительном тракте, т. е. измерительными устройствами в реальном масштабе времени.

В системах, которые содержат вычислительные устройства, обработка информации может производиться как в реальном масштабе времени,

так и с предварительным накоплением информации в памяти ЭВМ, т. е. со сдвигом по времени.

При исследовании сложных объектов или выполнении многофакторных экспериментов применяются измерительные системы, сочетающие высокое быстродействие с точностью. Такие ИИС характеризуются большими потоками информации на их выходе. Значительно повысить эффективность ИИС при недостаточной априорной информации об объекте исследования можно за счет сокращения избыточности информации, т. е. сокращения интенсивности потоков измерительной информации. Исключение избыточной информации, несущественной с точки зрения ее потребителя, позволяет уменьшить емкость устройств памяти, загрузку устройств обработки данных, а следовательно, и время обработки информации, что снижает требования к пропускной способности каналов связи.

При проектировании и создании ИИС большое внимание уделяется проблеме повышения достоверности выходной информации и снижения вероятностей возникновения (или даже исключения) нежелательных ситуаций. Этого можно достичь, если на ИИС возложить функции самоконтроля, в результате чего ИИС способна осуществлять тестовые проверки работоспособности средств системы и тем самым сохранять метрологические характеристики тракта прохождения входных сигналов, проверять достоверность результатов обработки информации, получаемой посредством измерительных преобразований, и ее представления.

Все более широкое развитие получают системы, предусматривающие автоматическую коррекцию своих характеристик - самонастраивающиеся (самокорректирующиеся) системы.

Введение в такие системы свойств автоматического использования результатов самоконтроля – активного изучения состояния ИИС – и приспособляемое к изменению характеристик измеряемых сигналов или к изменению условий эксплуатации делает возможным обеспечение заданных параметров системы.

1.6. Метрологическое обеспечение технических измерений

Решение важнейших научных, технических и других задач, в том числе обеспечение качества продукции, в значительной степени зависит от достижения единства и достоверности измерений.

Под единством измерений понимается состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражены в узаконенных единицах,

а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за заданные пределы. Государственная система обеспечения единства измерений – это комплекс нормативных, нормативно-технических и методических документов межотраслевого уровня, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единства измерений в стране при требуемой точности.

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) базируется на трех основах: технической, организационной и нормативной.

Техническую основу ГСИ составляют государственные эталоны, эталоны единиц физических единиц и стандартные образцы. На каждое из этих технических средств разработан нормативный документ. Порядок создания этих нормативных документов, их структура регламентирована требованиями и правилами Государственной системы стандартизации (ГСС).

Организационной основой ГСИ являются метрологические службы, цели, задачи, права, обязанности, порядок функционирования которых определяются нормативными документами, разрабатываемыми в соответствии с требованиями и правилами ГСС.

Наиболее прочная взаимосвязь ГСС и ГСИ имеется по нормативной основе последней. Именно в ней находят отражение цели и задачи стандартизации в области метрологии, основные принципы организации работ, категории нормативных документов.

В качестве нормативных документов по обеспечению единства измерений закон регламентирует государственные стандарты, применяемые в установленном порядке международные стандарты, правила, положения, инструкции и рекомендации.

Все СИ, предназначенные для производства или ввозимые из-за границы, подлежат испытаниям, под которыми понимается экспертиза технической документации на СИ и их экспериментальное исследование для определения степени соответствия нормам и современному уровню развития приборостроения.

Испытания вновь разрабатываемых и выпускаемых СИ являются эффективным средством обеспечения измерений и повышения качества измерительной техники. Цель испытаний – обеспечить высокий технический уровень приборостроения, соответствие характеристик средств измерений современным требованиям, установление оптимальной номенклату-

ры средств измерений, высокую степень унификации и стандартизации средств измерений.

Система испытаний и утверждения типа включает в себя:

- испытания типа средств измерений;
- принятие решений об утверждении типа;
- инспекционные испытания серийно выпускаемых и ввозимых из-за границы партиями СИ;
- признание утверждения типа или результата испытаний типа средств измерений, проведенное другими странами.

Система метрологического надзора за СИ представляет собой комплекс правил, положений и требований технического, экономического и правового характера, определяющих организацию и порядок проведения работ по поверке средств измерений.

Поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых органами Государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами и организациями) с целью установления пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным образцам.

Поверочная деятельность осуществляется аккредитованными метрологическими службами юридических лиц и контролируется органами Государственной метрологической службы.

Поверка производится в соответствии с нормативными документами, утверждаемыми по результатам испытаний при утверждении типа средств измерений.

Средства измерений подвергаются первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и экспертной поверке.

Первичной поверке подлежат СИ утвержденных типов при выпуске из производства и ремонта, при ввозе по импорту. Любое, ранее не поверенное СИ, после утверждения типа должно проходить поверку.

Периодической поверке подлежат СИ, находящиеся в эксплуатации или на хранении, через определенные межповерочные интервалы, установленные с расчетом обеспечения пригодности к применению СИ на период между поверками.

Межповерочный интервал устанавливается при утверждении типа. Он может быть изменен с учетом специфики применения средства измерений.

Внеочередную поверку проводят во время эксплуатации (хранения) средств измерений при:

- повреждении знака поверительного клейма, а также при утрате свидетельства о поверке;
- вводе в эксплуатацию средств измерений после длительного хранения, установке или использовании средств измерений для других целей;
- проведении повторной юстировки или настройки, известном или предполагаемом ударном воздействии на средство измерений или неудовлетворительной работе прибора;
- продаже (отправке) потребителю средств измерений, не реализованных по истечению срока, равному половине межповерочного интервала на них.

Инспекционную поверку проводят для выяснения пригодности к применению средств измерений при осуществлении государственного метрологического надзора.

Экспертную поверку проводят при возникновении спорных вопросов по метрологическим характеристикам, исправности СИ и пригодности их к применению.

Положительные результаты поверки средств измерений удостоверяются поверительным клеймом или (и) свидетельством о поверке.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям «измерение», «метод измерений» и «средство измерений».
2. Перечислите основные виды измерений.
3. Перечислите основные методы измерений.
4. Что относится к основным характеристикам измерений?
5. В чем состоит отличие прямых измерений от косвенных?
6. Приведите пример совокупных и совместных измерений.
7. Приведите классификацию средств измерений.
8. Что такое первичный измерительный преобразователь?
9. Назовите основные схематические принципы построения ГСП.

10. На какие группы разделяются устройства ГСП по функциональному признаку?
11. Для чего предназначены нормирующие преобразователи?
12. Что такое метрологическая характеристика средств измерений?
13. Перечислите основные нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
14. Приведите классификацию средств измерений.
15. По какой формуле рассчитывается относительная погрешность средства измерений?
16. Что характеризует класс точности прибора?
17. Дайте определение понятию «информационно-измерительная система».
18. Укажите назначение информационно-измерительной системы.
19. Укажите основные компоненты информационно-измерительных систем.
20. Как классифицируются информационно-измерительные системы по функциональному назначению?
21. Как классифицируются измерительные системы?
22. Чем отличаются активные измерительные системы от пассивных?
23. Что такое поверка средств измерений?
24. Укажите основные виды поверок.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1. Основные понятия

Измерение температур наряду с измерениями других величин имеет весьма важное значение в науке и технике. Современное промышленное производство немыслимо без температурного контроля. Достаточно указать на такие отрасли промышленности, как черная и цветная металлургия, химическая и нефтеперерабатывающая промышленность, во многих технологических процессах которых температурный контроль имеет решающее значение.

Температурой называют величину, характеризующую тепловое состояние тела. Согласно кинетической теории температурой называют физическую величину, количественно характеризующую меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества.

Из определения температуры следует, что она не может быть измерена непосредственно и судить о ней можно по изменению других физических свойств тел (объема, давления, электрического сопротивления, термо-ЭДС, интенсивности излучения и т.д.). Эти свойства тел называют термометрическими, а вещества, характеризующиеся такими свойствами, также называются термометрическими. По этой причине невозможно создать эталон температуры, подобно тому, как создаются эталоны других величин.

Средство измерения температуры называют **термометром**.

2.2. Температурные шкалы

С момента изобретения термометра Г.Галилеем в 1595г. предлагалось много различных температурных шкал.

В системе СИ основной единицей является Кельвин, который является единицей измерения в так называемой **абсолютной термодинамической шкале**. Градус Кельвина определяется как $1/273,16$ часть температуры тройной точки воды. Последняя есть температура равновесного состояния водяного пара, жидкой воды и льда. Для воспроизведения Кельвина интервал между абсолютным нулем температуры и температурой тройной точки воды делится на 273,16 части.

Привычная нам **десятичная температурная шкала** была предложена А. Цельсием в 1742 году, в которой расстояние по шкале между точкой

таяния льда и точкой кипения воды делилось на 100 частей. Градус Цельсия узаконен в системе СИ как производная единица, определяемая по формуле:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,16. \quad (2.1)$$

Во многих странах Западного полушария и в первую очередь в США общепринятой является **шкала Фаренгейта**. В качестве нижней опорной точки (0°F) изобретатель шкалы использовал температуру замерзания солевого раствора, самую низкую воспроизводимую в то время, а в качестве верхней точки - температуру тела человека (96°F – в старину было принято считать дюжинами). Сам изобретатель определял вторую эталонную точку как температуру под мышкой здорового англичанина. Согласно этой шкалы, разность температур между таянием льда и кипением воды делится на 180 частей, а температуре таяния льда приписана температура 32°F .

Перевод $^{\circ}\text{C}$ в $^{\circ}\text{F}$ легко можно сделать по формуле:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}(T(^{\circ}\text{F}) - 32). \quad (2.2)$$

В абсолютной термодинамической шкале температура в Кельвинах через температуру в градусах Фаренгейта выразится как:

$$T(\text{K}) = 255,38 + \frac{5}{9} T(^{\circ}\text{F}). \quad (2.3)$$

Довольно редко, но все еще встречаются термометры, отградуированные в градусах Реомюра. **Шкала Реомюра** строится таким образом, что разность температур плавления льда и кипения воды делится на 80 частей. Причиной этого является тот факт, что спирт с водой (основная термометрическая жидкость) расширяется между точками замерзания воды и точкой кипения на 8% своего объема. Размер градуса в шкале Реомюра можно воспроизвести изменением объема водно-спиртовой жидкости на $0,08/80 = 0,001$ первоначального объема. Соответственно, температурные интервалы в шкале Кельвина и Реомюра относятся как 100/80 или как 5/4, т. е.

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{4} T(^{\circ}\text{R}). \quad (2.4)$$

В системе СИ, как уже упоминалось, основной величиной принята термодинамическая температура, а единица в разных температурных диапазонах определяется по так называемым **реперным точкам** – фиксированным значениям температур, соответствующих либо тройным точкам, либо плавлению, либо затвердеванию чистых веществ, в основном, чистых металлов. Вещества с фиксированными температурными характеристика-

ми делятся на определяющие реперные температурные точки и вторичные. Такое подразделение делается по той причине, что у некоторых веществ температуры плавления или отвердевания хорошо воспроизводятся, а для некоторых при воспроизведении наблюдаются заметные расхождения.

Для обеспечения единства измерений температуры в качестве международного стандарта в 1968 году принята **Международная практическая температурная шкала МПТШ-68**. В 1990 году в соответствии с решением XVIII Генеральной конференции по мерам и весам введена **Международная температурная шкала (МТШ-90)**. МТШ-90, по сути, является практической температурной шкалой и заменяет собой предыдущую шкалу МПТШ-68. Основные изменения в шкале связаны с изменением температур реперных точек, расширением диапазона определения шкалы, введением новых интерполяционных приборов и новых методик построения интерполяционных зависимостей для платиновых термометров сопротивления. Шкала считается очень близко аппроксимирующей термодинамическую шкалу температур, поэтому слово «практическая» было опущено в ее названии. Перечень основных фиксированных точек МТШ-90 приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Перечень основных реперных точек МТШ-90

Реперная точка	Температура, К	Температура, °C
Тройная точка водорода	13,8033	–259,3467
Точка кипения равновесного водорода	≈20,3	≈ –252,85
Тройная точка неона	24,5561	–248,5939
Тройная точка кислорода	54,3584	–218,7916
Тройная точка аргона	83,8058	–189,3442
Тройная точка ртути	234,3156	–38,8344
Тройная точка воды	273,16	0,01
Точка плавления галлия	302,9146	29,7646
Точка затвердевания индия	429,7485	156,5985
Точка затвердевания олова	505,078	231,928
Точка затвердевания цинка	692,677	419,527
Точка затвердевания алюминия	933,473	660,323
Точка затвердевания серебра	1234,93	961,78

Вторичные точки шкалы МТШ-90 определены точками затвердевания и кипения следующих веществ: Hg, H₂O, Na, Bi, Cd, Pb, Sb, Ni, Co, Pd, Pt, Rh, Jr, W и ряда других. Вторичные точки, в основном, используются в области высоких температур, что дает возможность продлить температурную шкалу до точки плавления вольфрама – до 3414 К.

Международная температурная шкала постоянно развивается и дополняется. Так, в октябре 2000 года Международный комитет по мерам и весам при утвердил новую предварительную низкотемпературную международную шкалу ПНТШ-2000 (PLTS-2000), которая расширяет диапазон МТШ-90 в низкотемпературной области. Шкала начинается с температуры 0,902 мК, соответствующей твердому состоянию ³He и доходит до температуры 1 К, таким образом перекрывая диапазон МТШ-90 в интервале 0,65 -1 К. Шкала основана на измерении давления при плавлении ³He. В июне 2005 года консультативный комитет по термометрии выпустил Техническое приложение к МТШ-90, которое получило статус обязательного приложения к тексту шкалы. Дополнение касается определения температуры тройной точки воды и основано на результатах анализа расхождений значений температур ампул тройной точки воды, использующих воду разного изотопного состава.

В качестве эталонного термометра в интервале температур от 13,81 до 903,89 К принимается платиновый термопреобразователь сопротивления. Этот интервал разбит на 5 подинтервалов, для каждого из которых определены интерполяционные формулы в виде полиномов до четвертой степени.

В интервале температур от 903,89 до 1337,58 К используется эталонный платина – платинородиевый термоэлектрический термометр. Интерполяционной формулой, связывающей термо-ЭДС с температурой, здесь является полином второй степени.

Для температур выше 1337,58 К МТШ-90 воспроизводится с помощью квазимонохроматического пирометра с использованием закона излучения Планка.

2.3. Классификация средств измерения температуры

Все типы термометров принято разбивать на два класса в зависимости от методики измерений (рис. 2.1). Традиционный и наиболее массовый вид термометров – **контактные термометры**, отличительной особенностью которых является необходимость теплового контакта между датчи-

ком термометра и средой, температура которой измеряется. Вторую группу составляют **бесконтактные термометры**, для измерения которыми нет необходимости в тепловом контакте среды и прибора, а достаточно измерений собственного теплового или оптического излучения.

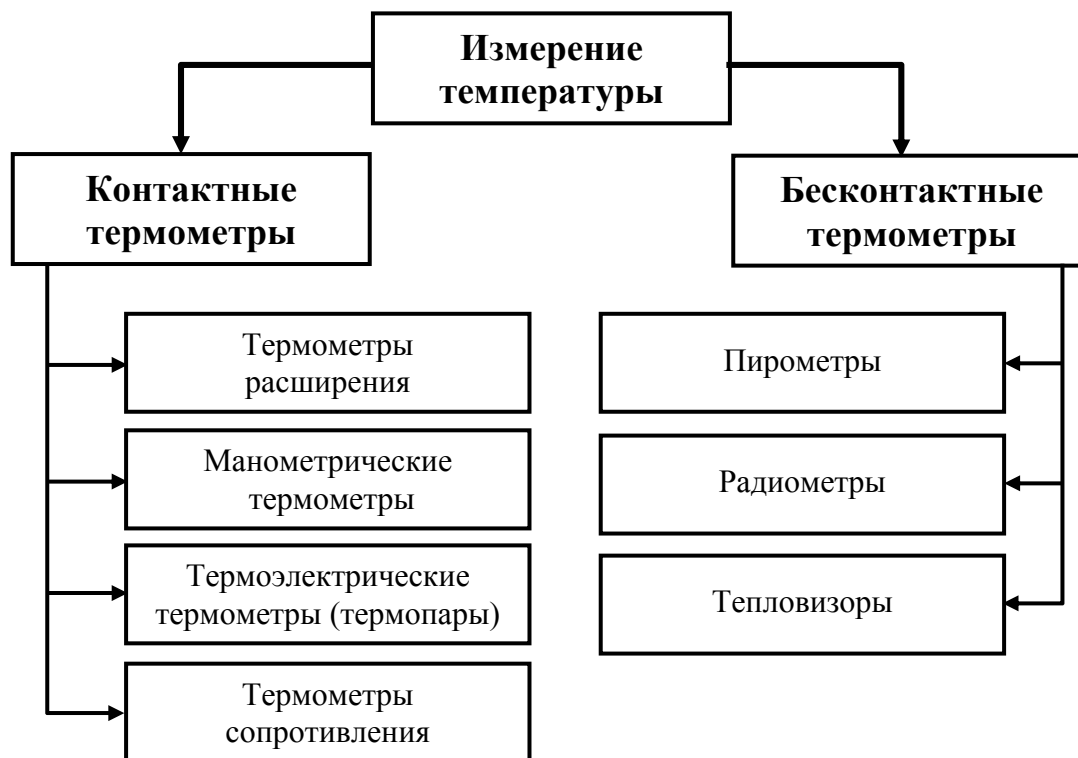


Рис.2.1. Классификация средств измерения температуры

Контактные приборы и методы по принципу действия разделяются на:

а) **термометры расширения**, принцип действия которых основан на зависимости объемного расширения жидкости и линейных размеров твердых тел от температуры;

б) **манометрические термометры**, принцип действия которых основан на изменении давления рабочего (термометрического) вещества в зависимости от температуры;

в) **термоэлектрические термометры (термопары)**, принцип действия которых основан на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы от температуры;

г) **термометры сопротивления**, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента (проводника или полупроводника) от температуры.

Бесконтактные методы, в основе которых лежит регистрация собст-

венного теплового или оптического излучения, можно представить следующими направлениями:

а) **пирометрия** – измерение температуры самосветящихся объектов: пламени, плазмы, астрофизических объектов;

б) **радиометрия** – измерение температуры по собственному тепловому излучению тел. Для невысоких и комнатных температур это излучение находится в инфракрасном диапазоне длин волн;

в) **тепловидение** – радиометрическое измерение температуры с пространственным разрешением и с преобразованием температурного поля в телевизионное изображение, иногда с цветовым контрастом. Позволяет измерять градиенты температуры, температуру среды в замкнутых объемах, например, температуру жидкостей в резервуарах и трубах.

2.4. Термометры расширения

2.4.1. Жидкостные термометры

Действие стеклянных жидкостных термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термометрического вещества и оболочки, в которой она находится (термометрического стекла или реже кварца). Стеклянные жидкостные термометры отличаются высокой точ-

ностью, простотой устройства и дешевизной, однако они хрупки, непригодны для ремонта, и не могут передавать показания на расстояние (за исключением электроконтактных ртутных термометров).

Основными элементами конструкции термометра (рис. 2.2) является резервуар 1 с припаянным к нему капилляром 2, заполненные частично термометрической жидкостью 3, и шкала 4.

В качестве термометрической жидкости в большинстве случаев используется химически чистая ртуть. Ртуть не смачивает стекло, легко получается в чистом виде, находится в жидком состоянии в широком диапазоне температур (от $-38,84$ до $356,58$ °C). Кроме нее использу-

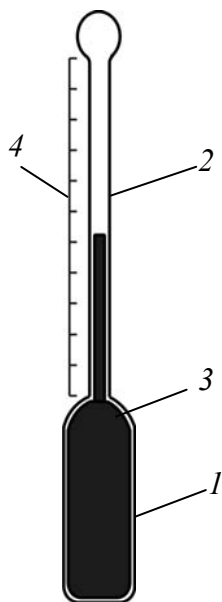


Рис.2.2. Стеклянный жидкостный термометр:
1 - резервуар; 2 – капилляр;
3 – термометрическая жид-
кость; 4 – шкала.

ется: толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан.

Конструктивно различают палочные термометры и термометры с вложенной шкалой. У палочных термометров шкала наносится на поверхность толстостенного капилляра. У термометров с вложенной шкалой капилляр и шкальная пластинка с нанесенной шкалой заключены в защитную оболочку, припаянную к резервуару.

Показания стеклянного термометра зависят не только от температуры резервуара, но и от температуры столбика жидкости в капилляре, поэтому лабораторные приборы градуируются при полном погружении термометра в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Если глубина их погружения не соответствует условиям градуировки, то в показания следует вносить поправку:

$$\Delta t = n\gamma(t - t_{BC}), \quad (2.5)$$

где n - число градусов в выступающем столбике; γ - температурный коэффициент расширения термометрической жидкости в стекле K^{-1} ; t - температура, показываемая термометром, $^{\circ}C$; t_{BC} - средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром, $^{\circ}C$. Технические термометры градуируются при частичном погружении на определенную глубину и при определенной температуре выступающего столбика.

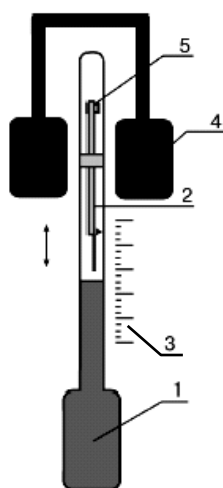


Рис. 2.3. Электроконтактный жидкостный термометр:

- 1 – резервуар со ртутью;
2 – подвижный контакт; 3 – шкала;
4 – вращающаяся головка с магнитами;
5 – винтовая пара

Выпускаются термометры для измерения температур от -100° до $600^{\circ} C$. Для защиты от механических повреждений термометры помещают в защитную арматуру.

Выпускаются также ртутные электроконтактные термометры (рис. 2.3), предназначенные для сигнализации или поддержания определенной температуры (с заданным постоянным контактом или с подвижным контактом). Ртуть 1, расширяясь, касается поверхностью контактного проводника 2, положение которого фиксируется специальным устройством 5. Положение проводника можно изменять вращением магнита 4, расположенного снаружи корпуса термометра.

2.4.2. Дилатометрические термометры

Дилатометрические термометры – средство измерения температуры, использующее преобразование ее изменения в разность удлинений двух твердых тел, обусловленную различием их температурных коэффициентов линейного расширения. Принцип действия дилатометрических датчиков температуры поясняется схемой, приведенной на рис. 2.4.

Изменение длины твердого тела от температуры может быть аппроксимировано линейной зависимостью:

$$l_k = l_n (1 + \alpha t), \quad (2.6)$$

где α – средний коэффициент линейного расширения в сравнительно нешироком диапазоне температур; l_k , l_n – длины термометров при конечной и начальной температурах.

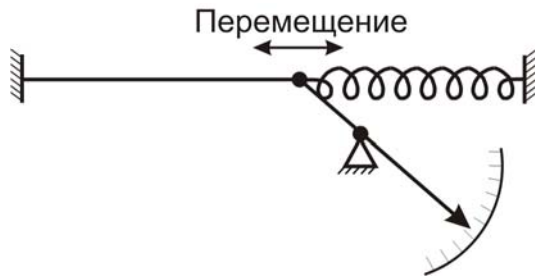


Рис. 2.4. Схема измерения дилатометрическим термометром

Если в начале рабочего диапазона t_n длина обоих твердых тел

одинакова и равна l_n , то возникающая в конце диапазона t_k разность удлинений тел Δl будет равна $\Delta l = l_n (\alpha_1 - \alpha_2) (t_k - t_n)$. Δl тем больше, чем больше $(\alpha_1 - \alpha_2)$.

Диапазон измерения термометров от -30 до 1000°C , погрешность $1,5 - 2,5\%$. Они обладают высокой надежностью и используются в релейных схемах.

2.4.3. Биметаллические термометры

Разновидностью дилатометрических термометров являются датчики температуры с биметаллическими пластинами. Используя тот же принцип работы – тепловое расширение тел при нагревании – в биметаллических датчиках измеряется не удлинение, а изгиб пластины, состоящей из двух

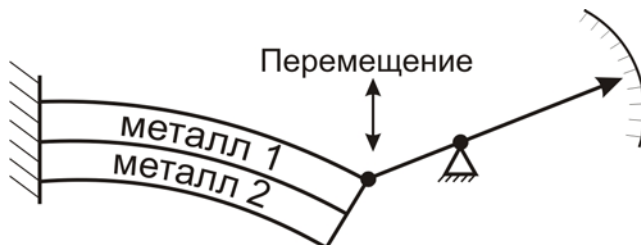


Рис. 2.5. Схема измерения биметаллическим термометром

металлов с разными температурными коэффициентами расширения. Схема такого датчика, получившего широкое применение в различных системах регулирования температуры, приведена на рис. 2.5.

При изменении температуры такой пластины она изгибается в сторону материала с меньшим коэффициентом линейного расширения (на рисунке – металл 2). Для закрепленной с одного конца биметаллической пластины длиной l и толщиной s перемещение A ее ненагруженного конца при изменении температуры пластины от t_1 до t_2 определится выражением:

$$A = \frac{\gamma \cdot l^2}{s} (t_2 - t_1), \quad (2.7)$$

где γ – удельный изгиб пластины, зависящий в основном от разности коэффициентов линейного расширения использованных металлов.

Из (2.7) следует, что перемещение ненагруженного конца пластины не зависит от ее ширины. Зависимость перемещения незакрепленного конца биметаллической пластины от температуры справедлива в том интервале температур, в котором оба используемых металла обладают упругой деформацией. Подбором специальных сплавов удастся создать биметаллический термометр с рабочим диапазоном температур от -100 до 600°C . Для увеличения длины пластины при сохранении малых габаритов чувствительного элемента его выполняют в виде спирали. В этом случае изменение температуры от t_1 до t_2 вызывает поворот ненагруженного конца спирали на угол φ :

$$\varphi = \frac{360}{\pi} \frac{\gamma l^2}{s} (t_2 - t_1). \quad (2.8)$$

Наибольшее распространение биметаллические термометры получили для работы при комнатной температуре – как для непосредственного ее измерения, так и для автоматического регулирования (в этом случае чувствительный элемент приводит в действие систему управления контактами реле).

Основная погрешность биметаллических термометров составляет 1-3% диапазона измерения, градуировочная характеристика близка к линейной. Однако чувствительные элементы термометров не взаимозаменяемы и приборы требуют индивидуальной градуировки. Она может осуществляться в термостатах путем сравнения с показаниями соответствующего образцового средства измерений.

2.5. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего вещества в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры.

В зависимости от агрегатного состояния рабочего вещества в термосистеме манометрические термометры подразделяют на **газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные)**.

Манометрические термометры могут быть использованы для измерения температур от -150 до 600°C . Диапазон измерения определяется наполнителем термосистемы. Термометры со специальными наполнителями (расплавленными металлами) пригодны для измерения температуры от 100 до 1000°C .

Термосистема термометра (рис.2.6) состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 3 и манометрической части 2. Вся система прибора (термобаллон, капиллярная трубка, манометрическая пружина) заполнена рабочим веществом. Термобаллон погружается в объект измерения. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне изменяется давление в замкнутой системе, которое через капиллярную трубку передается на манометрическую часть, представляющую собой манометр с трубчатой пружиной (см. раздел 3.6), являющийся измерительным прибором манометрического термометра. Термобаллон представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей, стойких к химическому воздействию измеряемой среды. Геометрические размеры термобаллона зависят от типа термометров и от задач измерения. Диаметр термобаллона находится в пределах от 5 до 30 мм, а его длина 60 - 500 мм. Капилляр, соединяющий термобаллон с манометрической трубкой, представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром $0,1$ - $0,5$ мм. Длина капилляра может быть до 60 м. Медные капилляры имеют стальную защитную оболочку, предохраняющую их от повреждения при монтаже и эксплуатации

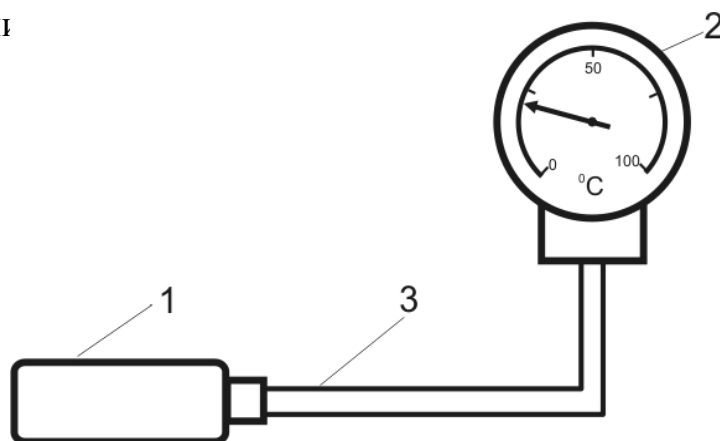


Рис. 2.6. Манометрический термометр:
1 – термобаллон; 2 – манометрическая часть;
3 – капиллярная трубка

По устройству манометрические термометры всех типов аналогичны. В зависимости от конструкции измерительной системы они бывают показывающими, самопишущими, бесшкальными со встроенными преобразователями для дистанционной передачи показаний.

Манометрические термометры – достаточно простые устройства, позволяющие осуществлять автоматическую регистрацию измерений и передачу показаний на расстояние. Выпускаются термометры с унифицированным пневматическим и электрическим сигналами. Достоинство этих термометров – возможность их использования на взрывоопасных объектах. К недостаткам относят необходимость частой поверки из-за возможной разгерметизации прибора и сложность ремонта, а также довольно большие размеры термобаллона.

2.5.1. Газовые манометрические термометры

Они предназначены для измерения температуры от -50 до 600°C . Термометрическим веществом здесь служит гелий или азот. Принцип работы газовых манометрических термометров основан на использовании закона Шарля:

$$P_t = P_0(1 + \beta(t - t_0)), \quad (2.9)$$

где t_0 и t – начальная и конечная температуры; P_0 и P_t – давление газа при температурах t_0 и t соответственно; β – термический коэффициент давления газа ($\beta = 1/273,15$ или $0,00366 \text{ K}^{-1}$).

Для реальных систем эта линейная связь строго не сохраняется, т.к. с изменением температуры изменяется объем термобаллона и с изменением давления – объем манометрической пружины, а также происходит массообмен между термобаллоном и капилляром. Но, поскольку эти изменения невелики, то можно считать, что шкала газовых манометрических термометров равномерна.

Подставляя в формулу (2.9) вместо P_t и t соответственно P_n и t_n , а также P_k , t_k , получим выражение для величины рабочего давления газового манометрического термометра:

$$\Delta P = P_k - P_n = \frac{P_n \cdot \beta \cdot (t_k - t_n)}{1 + \beta \cdot t_n}, \quad (2.10)$$

где P_n и P_k – давления в термосистеме, соответствующее начальному t_n и конечному t_k значениям температуры по шкале прибора.

По этой формуле может быть рассчитано начальное давление запол-

нения системы P_n для заданного диапазона измерения температур. P_n в зависимости от диапазона шкалы может быть в пределах от 1 до 3 МПа. Чем больше P_n , тем больше ΔP и тем меньше влияние барометрического давления на показания прибора.

Объем термобаллона V_T в газовых манометрических термометрах не зависит ни от рабочего давления, ни от пределов измерения температур. Но если при измерении температура, окружающая капилляр и манометрическую пружину, отличается от градуировочной температуры, то возникает дополнительная погрешность. Чтобы ее уменьшить, стремятся уменьшить отношение $(V_n + V_k)/V_T$ (где V_n и V_k – внутренний объем пружины и капилляра), увеличивая размер термобаллона. Поэтому для газовых манометрических термометров характерен большой размер термобаллона ($d = 20-30$ мм, $l = 250-500$ мм) и как следствие этого – их значительная инерционность.

2.5.2. Жидкостные манометрические термометры

В приборах этого типа всю систему термометра заполняют термометрической жидкостью под некоторым начальным давлением. В качестве термометрического вещества в данных термометрах используется ртуть под давлением 10-15 МПа при комнатной температуре или толуол, ксилол, пропиловый спирт, силиконовые жидкости при $P=0,5-5$ МПа. При ртутном заполнении диапазон измерений $-30 \div 600^\circ\text{C}$, а для органических жидкостей $-150 \div 300^\circ\text{C}$. Так как жидкость практически несжимаема, объем термобаллона в жидкостных термометрах должен быть согласован со свойствами манометрической пружины.

При измерении температуры от t_0 до t из термобаллона вытесняется жидкость объемом

$$\Delta V = V_0 (\beta_{жс} - 3\alpha) (t - t_0), \quad (2.11)$$

где $\beta_{жс}$ – температурный коэффициент объемного расширения жидкости; α – коэффициент линейного расширения материала термобаллона; V_0 – объем жидкости в термобаллоне при температуре t_0 .

Как следует из уравнения (2.11), изменение объема жидкости при нагревании является линейной функцией температуры, поэтому жидкостные термометры, как и газовые, имеют равномерную шкалу.

Благодаря большой теплопроводности жидкости термобаллон термометра сравнительно быстро принимает температуру измеряемой среды. Однако по этой же причине погрешности от колебания температуры окру-

жающей среды у жидкостных термометров больше, чем у газовых. При значительной длине капилляра для жидкостных термометров применяют компенсационные устройства в виде биметаллического компенсатора.

Из-за значительного давления в системе, которое предохраняет жидкость от закипания, погрешность от изменения барометрического давления в этих термометрах отсутствует.

Манометрическим жидкостным термометрам свойственна гидростатическая погрешность, вызванная различным положением манометра относительно термобаллона. Эта погрешность устраняется после монтажа прибора путем смещения указателя прибора на нужное значение по шкале.

2.5.3. Конденсационные манометрические термометры

В качестве манометрического вещества в этих термометрах используются легкокипящие жидкости (пропан, этиловый эфир, ацетон, толуол, хлористый метил и т.д.). Диапазон измерения $-50 \div 350^\circ\text{C}$. Специально изготовленные термометры применяются для измерения сверхнизких температур от 0,8 К.

Термобаллон термометра заполнен конденсатом примерно на 70-75% объема, а над конденсатом находится насыщенный пар этой же жидкости. Капилляр опущен в термобаллон так, что его конец находится в жидкости и в том случае, когда при максимальной температуре в термобаллоне остается часть жидкости.

Принцип работы конденсационных термометров основан на зависимости давления P насыщенного пара низкокипящих жидкостей от температуры:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\lambda}{t(V_n - V_{жс})}, \quad (2.12)$$

где λ – скрытая теплота испарения; V_n , $V_{жс}$ – удельные объемы пара и жидкости.

Давление в термосистеме конденсационного термометра равно давлению насыщенного пара при температуре рабочей жидкости, которая в свою очередь равна температуре измеряемой среды. Зависимость P насыщенного пара от температуры однозначна (до критической температуры), но нелинейна, из-за чего шкалы конденсационных термометров имеют значительную неравномерность. Для получения равномерной шкалы конденсационные термометры снабжают специальным линеаризующим устройством. Рабочее давление P зависит только от пределов измерения и за-

кона изменения давления насыщенного пара от температуры. Таким образом, давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры t , изменение температуры окружающей среды не оказывает влияния на показание прибора.

Поскольку термобаллон может быть выполнен малых размеров, то конденсационные термометры менее инерционны, чем другие манометрические термометры. Кроме того, эти термометры более чувствительны, т.к. давление насыщенного пара резко меняется с температурой.

Конденсационным термометрам присущи гидростатическая погрешность и погрешность от изменения барометрического давления. Первая компенсируется аналогично жидкостным термометром, а вторая значительна лишь на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико.

2.6. Термоэлектрические термометры

2.6.1. Основные понятия и определения

Измерение температуры термоэлектрическими термометрами (термоэлектрическими преобразователями, ТЭП) основано на использовании открытого в 1821 году немецким физиком Т.Зеебеком **термоэлектрического эффекта**, заключающегося в генерировании термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), возникающей из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов или сплавов, образующих часть одной и той же цепи.

В простейшем случае, если цепь состоит из 2-х разнородных материалов, то она носит название **термопары**.

Под **термоэлектрическим термометром** принято понимать комплект, состоящий из:

- 1) термопары, осуществляющей преобразование температуры в электрическое напряжение;
- 2) линий связи (удлиняющих проводов);
- 3) вторичного прибора для измерения термо-ЭДС.

2.6.2. Принцип действия

Термопара представляет собой цепь, состоящую из двух соединенных между собой разнородных проводников **А** и **В** (рис.2.7). Эти проводники называются **термоэлектродами**, места соединения термоэлектродов – **спаями**. Спай с температурой t , погружаемый в измеряемую среду, на-

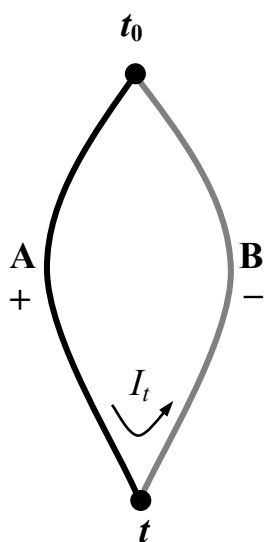


Рис. 2.7. Схема контура термопары

зывается **рабочим (измерительным)** спаем термопары, второй спай с температурой t_0 носит название **свободного (соединительного)**.

Зеебеком было установлено, что если температуры t_0 и t не равны, то в такой цепи будет протекать электрический ток I_t . Направление тока зависит от разности температур спаев. При размыкании такой цепи на концах может быть измерена термо-ЭДС. Этот эффект обладает и обратным действием, т.е. если через такую цепь пропустить электрический ток, то в зависимости от направления тока один из спаев будет нагреваться, а другой охлаждаться (эффект Пельтье).

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

Так два этих фактора — контактная разность потенциалов и диффузия электронов — являются слагаемыми результирующей термо-ЭДС цепи, значение которой зависит от природы термоэлектродов и разности температур спаев ТЭП.

В замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных проводников, при равенстве температур спаев ($t=t_0$) термоток I_t равен нулю. Таким образом, если спаи имеют одну и ту же температуру (t_0), то контактные ЭДС в каждом спае равны между собой и направлены навстречу друг другу. Результирующая термо-ЭДС контура в этом случае будет равна:

$$E_{AB}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t_0) = 0$$

или с учетом того, что $e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0)$,

$$E_{AB}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0,$$

т.е. результирующая термо-ЭДС контура равна арифметической сумме контактных термо-ЭДС (очередность записи термоэлектродов соответствует направлению обхода контура).

Для замкнутой цепи

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \text{ или } E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0). \quad (2.13)$$

Уравнение (2.13) называют основным уравнением ТЭП. Из него следует, что возникающая в контуре термо-ЭДС зависит от разности функций температур t и t_0 . Если сделать температуру свободных концов постоянной $t_0 = \text{const}$, то

$$e_{AB}(t_0) = C = \text{const} \text{ и } E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - C = f(t).$$

При известной зависимости $E(t, t_0) = f(t)$ путем измерения термо-ЭДС может быть найдена температура t , если $t_0 = \text{const}$.

В настоящее время нет приемлемой теории, способной предсказать зависимость $E(t, t_0) = f(t)$ в явном виде, что затрудняет градуировку ТЭП. При измерении температуры t для различных ТЭП эта зависимость определяется экспериментально путем градуировки и построения зависимости термо-ЭДС от измеряемой температуры. При градуировке температура $t_0 = \text{const}$. Ее значение в РФ стандартизировано, $t_0 = 0^\circ\text{C}$. На практике для различных ТЭП обычно используют стандартные градуировочные таблицы (см. Приложение 3).

2.6.3. Включение измерительного прибора в цепь термопары

Для измерения термо-ЭДС, развиваемой термопарой, в цепь включают измерительный прибор по одной из двух схем (рис. 2.8).

Обе схемы можно представить как включение в цепь третьего проводника С, т.к. схема измерительного прибора подразумевает замыкание цепи термопары посредством последовательного включения третьего проводника (как правило, медного) из которого выполнена измерительная рамка прибора, подгоночные сопротивления и т.д. В этом случае в местах

присоединения проводника С образуются дополнительные спаи, развивающие собственные термо-ЭДС, которые должны вносить погрешность в суммарную термо-ЭДС термопары.

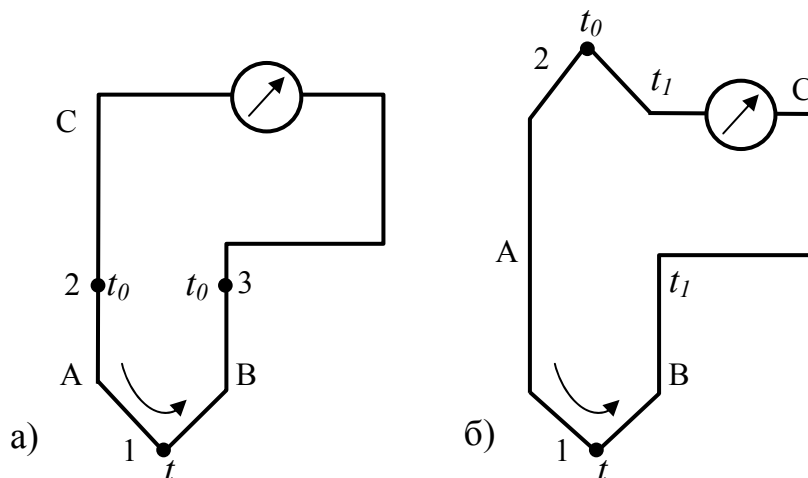


Рис. 2.8. Подключение измерительного прибора в цепь термопары:

- а) цепь с третьим проводником С, включенным в спай термопары;
- б) цепь с третьим проводником С, включенным в электрод термопары

При первом соединении (рис. 2.8, а) – один спай рабочий (точка 1), два свободных (точки 2 и 3). При втором включении (рис. 2.8, б) – один спай рабочий (точка 1), один свободный (точка 2) и два нейтральных при постоянной температуре t_1 .

Покажем, что термо-ЭДС, развиваемая в обоих случаях, одинакова.

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0).$$

Если $t = t_0$, то

$$E_{ABC}(t_0, t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0).$$

Тогда

$$-e_{AB}(t_0) = e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0)$$

или

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

Для цепи (рис. 2.8, б) получим:

$$E_{ABC}(t, t_1, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_0) + e_{BA}(t_0),$$

т.к. $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$, $e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0)$, то

$$E_{ABC}(t, t_1, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0). \quad (2.14)$$

Уравнение (2.14) совпадает с основным уравнением ТЭП (2.13), следовательно, термо-ЭДС ТЭП не изменится от введения в цепь третьего проводника при равенстве температур его концов. Этот вывод может быть отнесен к любому числу проводников и измерительных приборов. Чаше

всего измерительный прибор присоединяют к термопаре по схеме, приведенной на рис. 2.8, а.

2.6.4. Удлиняющие (компенсационные) термоэлектродные провода

Как было сказано выше, в комплект термоэлектрического термометра, помимо термопары и измерительного прибора ИП входят удлиняющие провода, которыми соединяются клеммы термопары и зажимы измерительного прибора. Причем длина этих проводов в каждом случае индивидуальна и зависит от взаимного расположения термопары и измерительного прибора. В этом случае в измерительной цепи появляются два дополни-

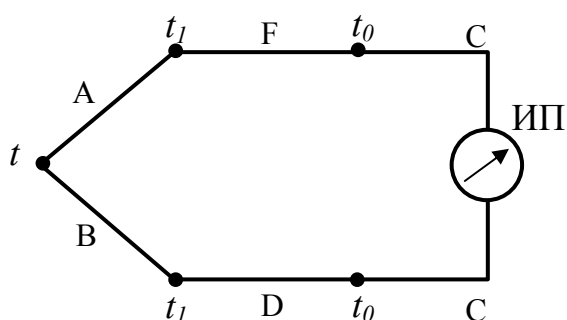


Рис. 2.9. Измерительная схема термоэлектрического термометра с удлиняющими проводами F и D.

тельных проводника: F и D (рис. 2.9).

При прокладке соединительной линии между термопарой и измерительным прибором свободные концы термометра, находящиеся на зажимах в его головке, будут расположены около нагретых поверхностей, т.е. в зоне переменной температуры t_1 . Чтобы отнести эти концы в зону с постоянной и более низкой температурой t_0 , применяются так называемые

термоэлектродные удлиняющие (компенсационные) провода, состоящие из двух жил, изготовленных из металлов или сплавов, имеющих одинаковые или схожие термоэлектрические свойства с термоэлектродами термометра.

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

Для термометров из неблагородных металлов удлиняющие провода изготавливаются чаще всего из тех же материалов, что и термоэлектроды, тогда как для термометров из благородных металлов в целях удешевления удлиняющие провода выполняются из материалов, развивающих в паре между собой примерно ту же термо-ЭДС, что и термометр, для которого они предназначены. Во избежание неправильного подключения компенсационного провода, изоляция его жил имеет определенную расцветку, в за-

висимости от используемого материала. В табл. 2.2 приведены характеристики основных типов компенсационных проводов.

Таблица 2.2

Характеристики компенсационных проводов и их применимость

Тип термопары	Компенсационный провод		
	Тип	Материал провода	Расцветка изоляции (соответственно)
Хромель–копелевая	ХК	хромель – копель	фиолетовый – желтый
Хромель–алюмелевая	ХА	хромель – алюмель	фиолетовый – белый
	М	медь – константан	красный – коричневый
Платинородий–платиновая	П	медь – сплав ТП	красный – зеленый

Если термоэлектродные провода правильно выбраны и подключены к ТЭП, то места их подключения к измерительному прибору рассматривают как свободные концы. Термоэлектродные провода подбираются таким образом, что в паре они имеют характеристику, совпадающую с характеристикой используемого ТЭП в интервале температур от $t_0=0^{\circ}\text{C}$ до $t\approx 100-120^{\circ}\text{C}$, т.е. $E_{FD}(t_l, t_0)=E_{AB}(t_l, t_0)$.

Тогда получим $E=E_{AB}(t, t_l)+E_{FD}(t_l, t_0)=E_{AB}(t, t_0)$, т.е. включение в цепь ТЭП термоэлектродных проводов не создает в цепи паразитных термо-ЭДС и не искажает результатов измерений.

Как правило, измерительный прибор располагается в помещении, где ведется наблюдение за температурой (помещение операторной), в котором температура более стабильна, чем в зоне, где находятся клеммы термопары. Но все-таки температура в этой зоне (комнатная температура) отличается от температуры градуировки термопары (0°C) и также, хоть и в малой степени, подвержена колебаниям. В этом случае суммарная термо-ЭДС термометра будет занижена (в случае, если температура в зоне свободных концов $>0^{\circ}\text{C}$) на величину термо-ЭДС между окружающей температурой и градуировочной.

В этой связи свободные концы термопары либо подлежат термостатированию, либо в показания термоэлектрического термометра должна быть внесена поправка.

2.6.5. Поправка на температуру свободных концов термопары ***Термостатирование.***

В лабораторных условиях температуру свободных концов обычно поддерживают равной 0°C . Для этой цели свободные концы термоэлектрического термометра, спаянные с медными проводниками, погружают в стеклянные пробирки с небольшим количеством масла, помещенные, в свою очередь, в сосуд Дьюара, наполненный тающим льдом. При этом необходимо, чтобы свободные концы были погружены в лед на глубину не менее (100-150) мм. При этом способе компенсация температуры свободных концов не требуется.

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

Введение поправки.

Для большинства случаев измерения температуры в промышленных условиях термостатирование не является приемлемым вариантом ввиду громоздкости термостатирующих устройств и потребности в постоянном за ними наблюдении. В этом случае необходимо вводить поправку на температуру свободных концов. Она должна компенсировать разницу между градуировочной температурой $t_0 (0^{\circ}\text{C})$ и текущей температурой в помещении t'_0 .

Существует два способа введения поправки: ручной и автоматический.

Ручной способ требует наличия вспомогательного термометра (например, ртутного) для измерения температуры t'_0 и градуировочной таблицы соответствующего ТЭП.

Алгоритм введения поправки следующий.

1) С помощью измерительного прибора определяется термо-ЭДС термопары $E(t'_0)$ при температуре свободных концов t'_0 .

2) По показаниям вспомогательного термометра определяется теку-

щее значение t'_0 .

3) По градуировочной таблице находится значение термо-ЭДС $E(t'_0, t_0)$, соответствующее величине поправки между $|t'_0 - t_0|$.

4) Скорректированное значение термо-ЭДС определяется по формуле:

$$E(t, t_0) = E(t, t'_0) \pm E(t'_0, t_0). \quad (2.15)$$

Знак «+» берется, когда температура $t'_0 > 0$, а «-», когда температура $t'_0 < 0$.

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

Компенсирующий мост (рис.2.10) представляет собой неуравновешенный мост с постоянными манганиновыми резисторами R_1, R_2, R_3 и медным резистором R_M . Диагональ **ав** подключена к источнику питания ИПС через нагрузочное сопротивление R_H , предназначенное для изменения напряжения питания моста при переходе к преобразователям с различной градуировкой.

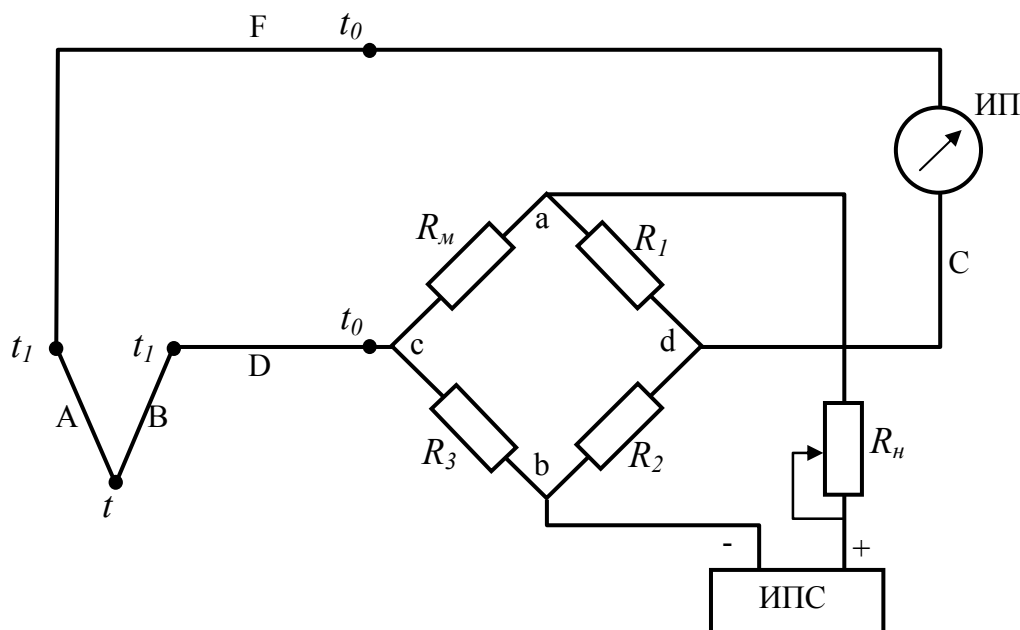


Рис.2.10. Схема автоматического введения поправки на температуру свободных концов термопары

Измерительная диагональ **cd** включена в разрыв между удлинительным проводом **F** и соединительным проводом **C**. При $t = 0^{\circ}\text{C}$ мост находится в равновесии, т.е. $U_{CD}=0$. При повышении температуры свободных концов сопротивление резистора R_m , расположенного рядом с концами удлинительных проводов **F** и **D**, также возрастет, в результате чего в диагонали появится напряжение U_{CD} . Данное напряжение компенсирует недостающую термо-ЭДС на значение поправки

$$U_{CD}=E_{AB}(t'_0, t_0),$$

т.е. на выходе измерительного прибора термо-ЭДС равна $E_{AB}(t'_0, t_0)+U_{CD}=E_{AB}(t, t_0)$.

2.6.6. Термоэлектродные материалы и типы термопар

Значение развиваемой термо-ЭДС зависит от материала термоэлектродов и температуры рабочего и свободного концов термометра. В качестве термоэлектродов преимущественно применяются те металлы и сплавы, которые развивают сравнительно большие термо-ЭДС. Применение термометров с более высокими значениями термо-ЭДС увеличивают надежность измерения температуры. Создаваемая термометрами термо-ЭДС сравнительно невелика – она составляет не более 8 мВ на каждые 100°C и при измерении высоких температур не превышает 70 мВ.

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

- жаростойкость и механическая прочность;
- химическая инертность;
- термоэлектрическая однородность;
- стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики;
- однозначная, желательно близкая к линейной, зависимость термо-ЭДС от температуры;
- высокая чувствительность.

Ни один из существующих в настоящее время материалов не удовлетворяет всем требованиям, поэтому для различных пределов измерения используются термоэлектроды из различных материалов.

В качестве термоэлектродных материалов для изготовления термометров применяются, главным образом, чистые металлы и их сплавы. Наибольшее распространение получили материалы: платина, платинородий,

хромель, алюмель и копель. Для измерений в лабораторных установках находят также применение медь, железо, константан и др.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 6616-94 «Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия» введен в действие в качестве государственного стандарта РФ с 1 января 1999 г. В стандарте нормализованы требования к двенадцати типам термоэлектрических преобразователей (табл. 2.3).

Преобразователи термоэлектрические на основе благородных и тугоплавких металлов.

Термопреобразователи вольфрамрений-вольфрамрениевые (ТВР) имеют самый высокий предел длительного применения – 2200°C, но только в неокислительных средах, так как на воздухе уже при температуре 600°C происходит очень быстрое окисление и разрушение термоэлектродов. Термопара устойчива в аргоне, гелии, сухом водороде и азоте, а также в вакууме. Основной недостаток – плохая воспроизводимость термо-ЭДС, вынуждающая группировать термоэлектродные пары по группам с номинальными статическими характеристиками А-1, А-2, А-3.

Термопреобразователи платинородий-платиновые (ТПП10 и ТПП13). Чаще всего используются в металлургическом производстве и при термообработке в диапазоне 1000÷1600°C. Модификация ТПП13 широко применяется на Западе. Термопары ТПП10 используются также в качестве эталонных средств. По совокупности свойств платина и платинородиевые сплавы являются уникальными материалами для термопар. Их основное свойство – хорошее сопротивление газовой коррозии, особенно на воздухе при высоких температурах. Указанное свойство в сочетании с высокой температурой плавления и достаточно большой термо-ЭДС, хорошей совместимостью со многими изолирующими и защитными материалами, а также с хорошей технологичностью и воспроизводимостью метрологических характеристик, делает их незаменимыми при изготовлении электродов термопар для измерения высоких температур в окислительных средах. Эти сплавы устойчивы в аргоне и гелии, не растворяют азот и водород, не образуют нитридов и гидридов, не взаимодействуют с СО и СО₂.

К недостаткам данных ТЭП можно отнести высокую чувствительность термоэлектродов к любым загрязнениям, появляющимся при изготовлении, монтаже или эксплуатации ТЭП, а также их высокую стоимость.

Таблица 2.3

Химический состав основных типов ТЭП и пределы измеряемых температур

Тип термоэлектрического преобразователя	Обозначение градуировки (РФ)	Обозначение градуировки (МЭК)*	Химический состав термоэлектродов, масс. %		Пределы измерения температур, С		
			положительный	отрицательный	нижний	верхний	кратковременн
Хромель-алюмелевая	ТХА	К	Ni+9.5 Cr	Ni+1Si+2Al+2.5Mn	-200	1200	1300
Хромель-копелевая	ТХК	L	Ni+9.5 Cr	Cu+(42-44)Ni+0.5Mn+0.1Fe	-200	600	800
Хромель-константановая	ТХКн	E	Ni+9.5 Cr	Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe	-200	700	900
Медь-копелевая	ТМК	M	Cu	Cu+(42-44)Ni+0.5Mn+0.1Fe	-200	100	-
Медь-константановая	ТМКн	T	Cu	Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe	-200	350	400
Железо-константановая	ТЖК	J	Fe	Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe	-200	750	900
Нихросил-нисиловая	ТНН	N	Ni+14.2Cr+1.4Si	Ni+4.4Si+0.1Mg	-270	1200	1300
Сильх-силиновая	ТСС	I	Ni+9Cr+0.9Si	Ni+(2-2,8)Si	0	800	-
Платинородий-платиновые	ТПП13	R	Pt+13Rh	Pt	0	1300	1600
	ТПП10	S	Pt+10Rh	Pt			
Платинородий-платинородидная	ТПР	B	Pt+30Rh	Pt+6Rh	600	1700	-
Вольфрамений-вольфрамениевые	ТВР	A-1; A-2; A-3	W+5%Re	W+20%Re	0	2200	2500

* МЭК – международный электротехнический комитет.

Термопреобразователи платинородий-платинородиевые (ТПР). Особенностью ТЭП типа ТПР является очень малая термо-ЭДС, при 20⁰С – 0,002 мВ, при 120⁰С – 0,04 мВ, поэтому она не требует введения поправки на температуру холодного спая.

Преобразователи термоэлектрические на основе неблагородных металлов.

Термопреобразователи хромель-копелевые (ТХК) обладают наибольшей дифференциальной чувствительностью из всех промышленных ТЭП, применяются для точных измерений температуры, а также для измерений малых температурных разностей. ТХК свойственна исключительно высокая термоэлектрическая стабильность при нагревах до 600⁰С, обусловленная тем, что изменения термо-ЭДС хромелевого и копелевого термоэлектродов направлены в одну и ту же сторону и компенсируют друг друга. Технический ресурс термопар может составлять несколько десятков тысяч часов. К недостаткам ТХК можно отнести относительно высокую чувствительность к деформации.

Термопреобразователи хромель-алюмелевые (ТХА) являются самыми распространенными термопреобразователями в промышленности и научных исследованиях. ТХА предназначена для измерения температуры до 1200⁰С (длительно) и 1300⁰С (кратковременно) в окислительных и инертных средах. Термопреобразователь широко используется во всех отраслях промышленности: в печах, нагревательных устройствах, энергосиловом оборудовании. Номинальная статическая характеристика ТХА близка к линейной, дифференциальная термо-ЭДС около 40 мкВ/⁰С во всём диапазоне измеряемых температур. Главное преимущество ТХА по сравнению с другими термопарами из неблагородных металлов состоит в значительно большей стойкости к окислению при высоких температурах. Технический ресурс термопар при температурах менее 850⁰С ограничивается только дрейфом термо-ЭДС, так как жаростойкость хромеля и алюмеля позволяет использовать их при этих температурах десятки тысяч часов. К недостаткам ТХА относятся присущие ей два вида нестабильности термо-ЭДС: обратимая циклическая нестабильность и необратимая нестабильность, накапливающаяся со временем.

На рис.2.11 приведены градуировочные зависимости стандартных, наиболее распространенных термопар.

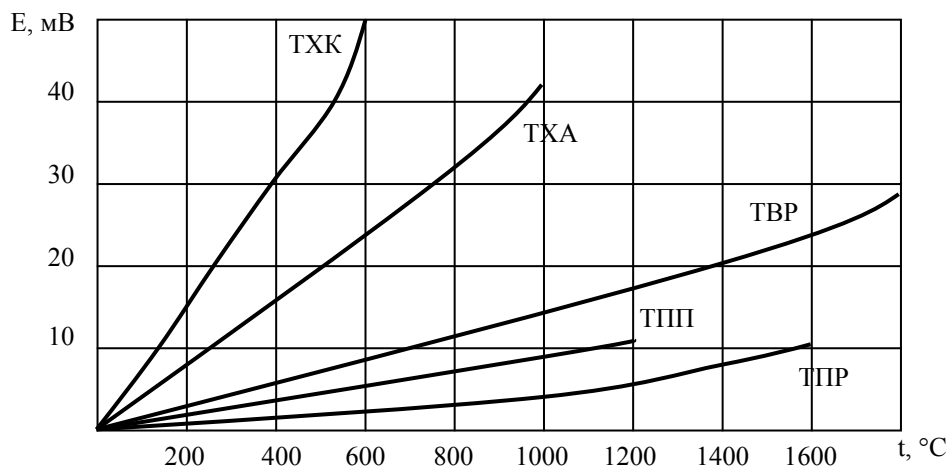


Рис. 2.11. Градуировочные зависимости основных типов термопар

2.6.7. Конструкция термопары

Конструктивное выполнение термопар определяется условиями их применения.

По типу исполнения стандартные ТЭП делятся на:

- а) погружаемые и поверхностные;
- б) стационарные и переносные;
- в) одинарные, двойные и тройные;
- г) однозонные и многозонные;
- д) обыкновенные, водозащищенные, взрывобезопасные и т.д.

Возможны различные сочетания этих исполнений.

Конструктивно термоэлектрический преобразователь представляет собой две проволоки из разнородных материалов, нагреваемые концы которых скручиваются, а затем свариваются или спаиваются. Конструктивное оформление термопар разнообразно. На рис 2.12 представлена конструкция термопары, которая чаще всего используется для измерения температуры в трубопроводах и других аппаратах, находящихся под давлением.

Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, электроды ТЭП, армированные изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру. У рабочих преобразователей, применяемых для измерения температуры различных сред, арматура состоит из защитного чехла 1, неподвижного или передвижного штуцера 5 с сальниковым уплотнением (на рисунке не показано) и головки 7, прочно присоединенной к защитному чехлу. В головке, снабженной крышкой 8 и штуцером под кабель 9, помещена розетка 6 из изоляционного ма-

териала с клеммами для присоединения термоэлектродов 2 и проводов, соединяющих термопару с измерительным прибором или преобразователем.

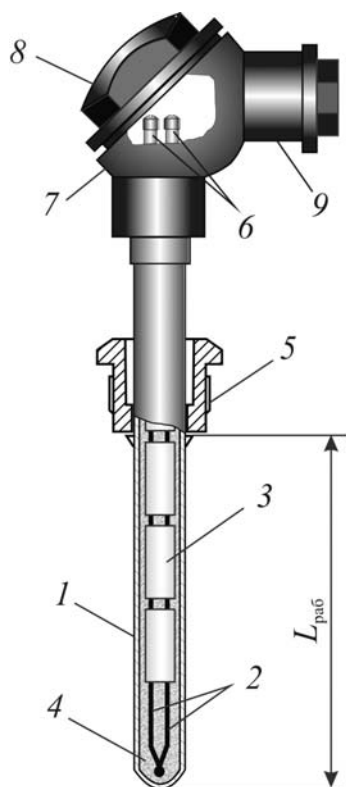


Рис. 2.12. Конструкция термопары:
1 – защитный чехол; 2 – термоэлектроды;
3 – изоляционные бусы; 4 – порошок;
5 – штуцер; 6 – розетка с клеммами;
7 – головка; 8 – крышка; 9 – штуцер под кабель

В качестве изоляции термоэлектродов термометра применяются одно- или двухканальные трубки или бусы 3 из фарфора (при температуре до 1300 °С) и окислов алюминия, магния или бериллия (свыше 1300 °С), надеваемые на термоэлектроды. Свободное пространство между термоэлектродами и защитным чехлом заполнено порошком окиси алюминия 4 для улучшения теплопередачи.

Длина монтажной (рабочей) части $L_{\text{раб}}$, погружаемой в среду, температуру которой измеряют, выполняется различной для каждого конкретного типа ТЭП.

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

Выпускаются **одинарные** (с одним чувствительным элементом) и **двойные** (с двумя чувствительными элементами) термоэлектрические пре-

образователи различных типов. Двойные термопары применяются для измерения температуры в одном и том же месте одновременно двумя вторичными приборами, установленными в разных пунктах наблюдения. Они содержат два одинаковых чувствительных элемента, заключенных в общую арматуру. Термоэлектроды их изолированы друг от друга и защитного чехла.

В настоящее время во всём мире широкое распространение получили термоэлектрические преобразователи, изготавливаемые из **термопарного кабеля** (рис. 2.13). Он представляет собой гибкую металлическую трубку с расположенными внутри неё одной или двумя парами термоэлектродов, расположенными параллельно друг другу. Пространство вокруг термоэлектродов заполнено сильно уплотнённой мелкодисперсной минеральной изоляцией.

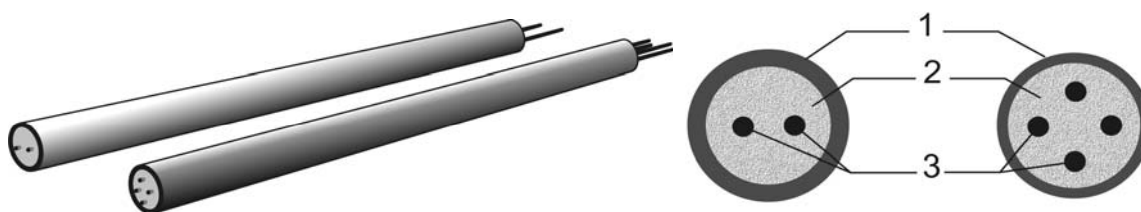


Рис. 2.13. Термопарный кабель с одной или двумя парами термоэлектродов:

1 - оболочка кабеля; 2 - минеральная изоляция (MgO); 3 – термоэлектроды

В РФ выпускают термопарный кабель с двумя типами термоэлектродов: КТМС-ХА и КТМС-ХК (кабель термопарный с минеральной изоляцией в стальной оболочке с хромель-алюмелевыми или хромель-копелевыми термоэлектродами) диаметром от 0,9 до 7,2 мм с изоляцией из электротехнического периклаза. Оболочка кабеля изготовлена из жаростойкой стали или сплава. Термопарный кабель за счёт высокой плотности заполнения периклазом выдерживает изгиб на 180° вокруг цилиндра диаметром, равным пятикратному диаметру кабеля.

К достоинствам кабельных термопар можно отнести:

- более высокие термоэлектрическая стабильность и рабочий ресурс по сравнению с проволочными термопреобразователями (в 2-3 раза);
- возможность изгиба, монтажа в труднодоступных местах, в кабельных каналах, при этом длина ТП может достигать 60-100 метров. Термопары можно приваривать, припаивать или просто прижимать к поверхности для измерения её температуры;

- малый показатель тепловой инерции, позволяющий применять их для регистрации быстропротекающих процессов;
- универсальность применения для различных условий эксплуатации, хорошая технологичность, малая материалоемкость;
- способность выдерживать большие рабочие давления;
- возможность изготовления на их основе термопреобразователей в защитных чехлах блочно-модульного исполнения, обеспечивающих дополнительную защиту термоэлектродов от воздействия рабочей среды и создающих возможность оперативной замены чувствительного элемента.

2.6.8. Основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар

Среди источников погрешностей можно выделить как явления, специфичные только для термопар, так и общие (шумы и помехи), характерные для любых измерительных систем. Рассмотрим кратко эти явления и методы их нейтрализации.

Плохой контакт в месте спая и раскалибровка.

Для соединения разнородных металлов между собой чаще всего применяются пайка припоем и сварка. При температурах, близких к точке плавления припоя, возможно нарушение контакта и даже разрыв термопары (эту ситуацию можно выявить по изменению характеристик термопары). Термопары, соединенные с помощью сварки, выдерживают более высокие температуры, однако при сварке структура и химический состав проводников могут деградировать, что приводит к возникновению погрешностей.

Раскалибровка термопары (возникновение несоответствия рабочей характеристики термопары калибровочному полиному) также может являться результатом химического изменения материала термоэлектродов под действием высоких температур. Чтобы уменьшить такие погрешности, можно прибегнуть к повторной калибровке или замене термопары.

Шунтирование термопары и гальванический эффект.

При высоких температурах электрическое сопротивление материалов изоляционных оболочек термоэлектродов снижается и может стать меньше омического сопротивления самих электродов. Это эквивалентно включению в цепь термопары шунтирующего резистора и образованию

нового паразитного сая, имеющего температуру, отличную от измеряемой.

Также при высоких температурах, особенно при измерении температуры жидкости, возможно образование (проникновение) электролита внутрь термопары и возникновение гальванического эффекта, также приводящего к ошибкам измерения.

Шумы и помехи.

Поскольку выходной сигнал термопары очень мал, необходимо принимать специальные меры для снижения уровня шумов (и соответственно погрешности измерения). Кратко остановимся на наиболее важных из них.

1) Соединительные проводники для подключения термопар должны быть изготовлены из материалов с коэффициентом Зеебека, максимально близким к материалам термопары.

2) Необходимо стремиться к максимальному сокращению длины соединительных проводников между термопарой и цифровым измерительным устройством. В случае большого удаления термопары от измерительного устройства следует использовать располагаемые в непосредственной близости от термопар специальные модули нормализации сигналов, превращающие термо-ЭДС в токовый сигнал (например, 4-20 мА) или непосредственно в цифровой отсчет. Кроме того, эти модули, как правило, обеспечивают гальваническую развязку сигналов и содержат устройства компенсации холодного сая. Дополнительные затраты окупаются надежностью, точностью и стабильностью работы системы.

3) Как можно шире использовать экранирование термопар и соединительных проводников для борьбы с помехами общего вида, особенно если проводники проходят рядом с источниками наводок и помех, а также при измерениях в электропроводящих средах.

4) Использовать фильтрацию сигналов для снижения уровня высокочастотных помех.

5) При многоканальных измерительных системах использовать метод временного отключения не используемых в данный момент групп каналов для предотвращения суммирования их шумов с сигналом измеряемого канала.

6) Использовать проводники, не отводящие тепло от измеряемой зоны.

2.6.9. Средства измерения сигналов термопар

Для измерения термо-ЭДС, развиваемой термопарами, используются магнитоэлектрические милливольтметры, потенциометры и нормирующие преобразователи.

Магнитоэлектрический милливольтметр.

Простейшим прибором, которым измеряют термо-ЭДС термопар, является милливольтметр. Милливольтметры являются электроизмерительными приборами магнитоэлектрической системы (рис. 2.14).

В конструкции милливольтметров можно выделить магнитную и подвижную системы. Первая состоит из подковообразного магнита 1, полюсных наконечников 2 и цилиндрического сердечника 3. Наличие сердечника в междуполюсном пространстве магнита уменьшает магнитное сопротивление и формирует радиальный магнитный поток.

В кольцевом воздушном зазоре между полюсными наконечниками 2 и сердечником 3 вращается рамка 4, изготовленная из изолированного медного провода и монтируемая на кернах, опирающихся на подпятники, либо на натянутых нитях.

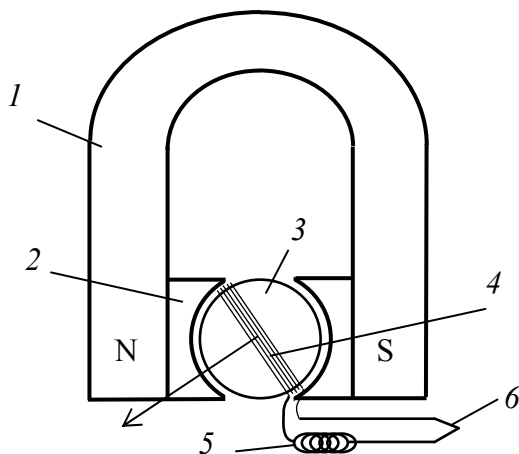


Рис. 2.14. Милливольтметр:
1 – магнит; 2 – полюсные наконечники; 3 – сердечник; 4 – рамка;
5 – спиральная пружина;
6 – термопара

Момент сил, противодействующий вращению рамки, создается специальной пружиной 5, служащей одновременно тоководом к рамке. С помощью грузиков магнитная система уравнивается так, чтобы ее центр тяжести находился на оси рамки.

Рамка представляет собой прямоугольник длиной l и шириной $2r$ и состоит из n витков тонкой медной проволоки, скрепленных между собой лаком. Благодаря сердечнику, расположенному внутри рамки, последняя оказывается под действием

равномерного и радиального магнитного поля, из-за чего, независимо от угла поворота рамки, плоскость оказывается параллельной вектору магнитной индукции B . Таким образом, при протекании по рамке электрического тока I на подвижную систему действует магнитоэлектрический момент:

$$M=2rIBI. \quad (2.16)$$

Противодействующий момент M_{np} , создаваемый спиральной пружиной:

$$M_{np}=W\varphi, \quad (2.17)$$

где W – удельный противодействующий момент, φ – угол поворота рамки.

При некотором угле поворота φ имеем $M_{np}=M$, т.е.

$$W\varphi=2rIBI \quad \text{или} \quad \varphi=\frac{2rIB}{W}I=S_iI,$$

где $S_i=\frac{2rIB}{W}=\frac{\varphi}{I}$ – чувствительность измеряемого механизма по току (рад/А).

Зависимость угла поворота рамки от напряжения U , подведенного к зажимам прибора с внутренним сопротивлением R_M равна

$$\varphi=S_i\frac{U}{R_M}=S_uU, \quad (2.18)$$

где $S_u=S_i/R_M=\varphi/U$ – чувствительность прибора по напряжению.

Измерение термо-ЭДС осуществляется по схеме, приведенной на рис.2.15. Генерируемая ТЭП термо-ЭДС $E_{AB}(t,t_0)$ создает в замкнутой цепи ток

$$I=\frac{E_{AB}(t,t_0)}{R_{AB}+R_{np}+R_{np}+R_y+R_p+R_d}=\frac{E_{AB}(t,t_0)}{R_{BH}+R_M}, \quad (2.19)$$

где R_y – сопротивление уравнительной катушки, R_d – сопротивление добавочной катушки, R_{np} – сопротивление подводящих проводов, $R_{BH}=R_{AB}+R_{np}+R_{np}+R_y$ – внешнее по отношению к зажимам **а-в** прибора сопротивление цепи, $R_M=R_d+R_p$ – внутреннее сопротивление милливольтметра.

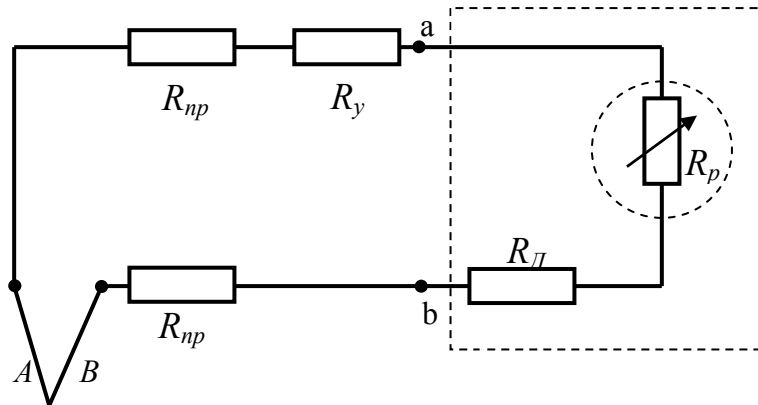


Рис.2.15. Схема измерения термо-ЭДС милливольтметром.

Измеренное милливольтметром напряжение U_{AB} всегда меньше, чем ЭДС в цепи на значение падения напряжения IR_{BH} во внешней цепи:

$$U_{AB} = IR_M = E_{AB}(t, t_0) - IR_{BH}. \quad (2.20)$$

Если $R_{BH} + R_M = \text{const}$, то между показаниями милливольтметра и измеряемой ЭДС однозначная зависимость:

$$\varphi = S_i \frac{E_{AB}(t, t_0)}{R_{BH} + R_M} \quad (2.21)$$

и шкалу милливольтметра можно градуировать в градусах по соответствующей градуировочной характеристике.

Сопротивления внешней цепи R_{BH} и милливольтметра R_M изменяются в зависимости от температуры окружающей среды, что приводит к погрешности измерения. Уменьшить температурную погрешность можно за счет выбора соотношений R_{BH}/R_M и R_P/R_M .

$$U_{AB} = IR_M = \frac{E_{AB}(t, t_0)}{1 + R_{BH}/R_M}, \quad (2.22)$$

следовательно, чем меньше R_{BH}/R_M , тем меньше изменение этого отношения скажется на зависимости U_{AB} от $E_{AB}(t, t_0)$. Уменьшение R_{BH}/R_M возможно за счет увеличения R_M , но т.к. R_M состоит из сопротивления рамки, выполненной из медного провода с сопротивлением R_P и добавочного сопротивления R_D , то R_M увеличивают за счет увеличения добавочного сопротивления R_D , выполненного в виде манганиновой катушки. Значительное увеличение R_M приводит к увеличению чувствительности милливольтметра. Обычно, $R_M = 100-500$ Ом, а отношение $R_P/R_M = 1/3$, что значительно уменьшает температурный коэффициент прибора.

Значение R_{BH} стандартизовано в пределах $0,6 \div 25$ Ом и указано на шкале прибора. При использовании милливольтметра с градусной шкалой необходимо сопротивление внешней линии подогнать к значению R_{BH} , указанному на шкале прибора, с помощью подгоночного сопротивления R_y . Если милливольтметр имеет милливольттовую шкалу, то она наносится без учета сопротивления R_{BH} и показания прибора соответствуют сопротивлению на его зажимах, т.е. U_{AB} . По известным R_M и R_{BH} определяют $E_{AB}(t, t_0)$, а затем по градуировочным таблицам определяют температуру.

Милливольтметры, предназначенные для работы с ТЭП, бывают переносными и щитовыми. Щитовые милливольтметры имеют только градусную шкалу. Класс точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,0.

Потенциометр.

Принцип действия потенциометра основан на компенсации неизвестной термо-ЭДС известным падением напряжения, создаваемым током от дополнительного источника $E_{\bar{\theta}}$ (рис.2.16).

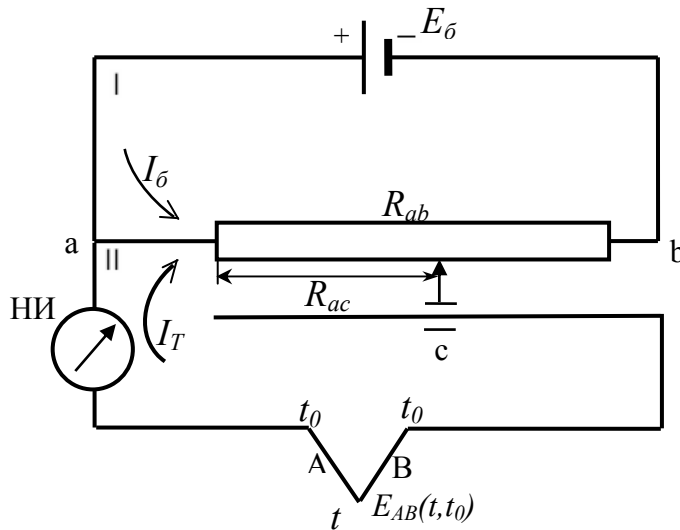


Рис.2.16. Измерительная схема потенциометра

Замкнутый контур I содержит дополнительный источник тока $E_{\bar{\theta}}$ и реохорд R_{ab} . Реохорд представляет собой переменный резистор из тонкой калиброванной проволоки (выполненной из специального сплава), намотанной на цилиндрический стержень, и снабженный подвижным контактом для изменения сопротивления. Этот контур называют компенсационным. Сила

тока $I_{\bar{\theta}}$ в этом контуре определяется величиной $E_{\bar{\theta}}$ и сопротивлением реохорда R_{ab} .

Контур II включает в себя ТЭП, термо-ЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ которого измеряется и чувствительный гальванометр, выполняющий функции нуль-индикатора (НИ), а также часть реохорда R_{ac} от точки а до подвижного контакта с движка реохорда. Источник измеряемой термо-ЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ включен навстречу дополнительному источнику $E_{\bar{\theta}}$ так, что токи от обоих источников на участке R_{ac} идут в одном направлении. Для контура II на основании закона Кирхгофа имеем:

$$E_{AB}(t, t_0) = I_T R_{вн} + I_T R_{ни} + I_T R_{ac} + I_{\bar{\theta}} R_{ac}, \quad (2.23)$$

где I_T – сила тока в контуре ТЭП; $R_{вн}$ – внешнее сопротивление термодпары и подводящих проводов; $R_{ни}$ – сопротивление нуль-индикатора.

Откуда

$$I_T = \frac{E_{AB}(t, t_0) - I_{\bar{\theta}} R_{ac}}{R_{вн} + R_{ни} + R_{ac}}. \quad (2.24)$$

Перемещая движок реохорда можно добиться, чтобы $I_T = 0$, тогда

$$E_{AB}(t, t_0) = I_{\bar{\theta}} R_{ac},$$

т.е. при $I_T = 0$, падение напряжения U_{ac} на участке **ac** служит мерой измеряемой термо-ЭДС.

Достоинством компенсационного метода измерения термо-ЭДС является отсутствие тока в цепи в момент измерения. Это исключает необходимость учета значения сопротивления внешней цепи, а также изменение сопротивления $R_{вн}$ при изменении температуры.

Компенсирующее напряжение можно измерять двумя методами:

1. поддерживая постоянное значение тока $I_{\bar{o}}$, измерять R_{ac} ;
2. сохраняя сопротивление R_{ac} постоянным, измерять значение рабочего тока $I_{\bar{o}}$.

Наибольшее распространение получили **потенциометры с постоянной силой рабочего тока** (рис.2.17).

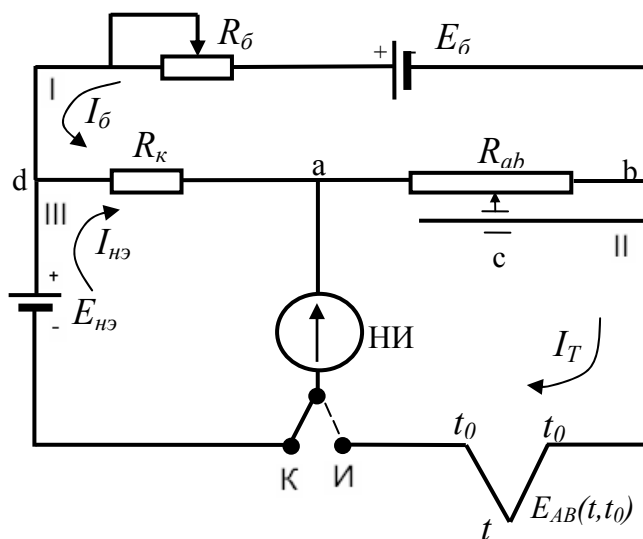


Рис 2.17. Потенциометр с постоянной силой рабочего тока

Для контроля постоянства рабочего тока введен дополнительный III контур – контур нормального элемента. Нормальный элемент представляет собой образцовую меру ЭДС $E_{нэ}=1,0186$ В и сохраняет эту ЭДС при кратковременных и малых нагрузках длительное время. При установке ключа в положение **К** (контроль) проводят сравнение ЭДС нормального элемента $E_{нэ}$ с падением напряжения U_{da} на постоянном резисторе R_{κ} . Если при этом $I_{нэ} \neq 0$ (стрелка нуль-индикатора не стоит на нуле), т.е. $U_{da} \neq E_{нэ}$, то с помощью реостата $R_{\bar{o}}$ изменяют ток $I_{\bar{o}}$ в контуре I до тех пор, пока стрелка нуль-индикатора не установится на 0, тогда $E_{нэ} = U_{da}$. Так как $U_{da} = I_{\bar{o}} R_{\kappa}$ и $R_{\kappa} = 509,3$ Ом,

$$I_{\bar{o}} = \frac{E_{нэ}}{R_{\kappa}} = \frac{1,0186}{509,3} = 2 \text{ мА}.$$

После стандартизации значения тока $I_{\bar{o}}$ ключ переводят в положение "измерение" **И** и перемещают движок реохорда R_{ab} до установки стрелки нуль-индикатора на нуле. При этом

$$E_{AB}(t, t_0) = I_{\delta} R_{ac} = \frac{E_{нэ} R_{ac}}{R_{\kappa}}.$$

При равномерной намотке реохорда сопротивления его участков пропорциональны соответствующим длинам, т.е. $R_{ac}/R_{ab} = l/L$ и тогда

$$E_{AB}(t, t_0) = \frac{E_{нэ} R_{ac}}{R_{\kappa}} = \frac{E_{нэ} R_{ab}}{R_{\kappa} L} = K, \quad (2.26)$$

где K – константа.

Таким образом, измерение ЭДС сводится к измерению длины l участка реохорда, которая проградуирована в единицах напряжения. Потенциометры, работающие по этой схеме имеют класс точности до 0,005.

В схеме **потенциометра с переменной силой рабочего тока** (рис. 2.18) измеряемая термо-ЭДС $E(t, t_0)$ компенсируется падением напряжения $I_{\delta} R_{ab}$ на постоянном и известном сопротивлении R_{ab} путем изменения значения тока I_{δ} в компенсирующем контуре I с помощью реостата R_{δ} .

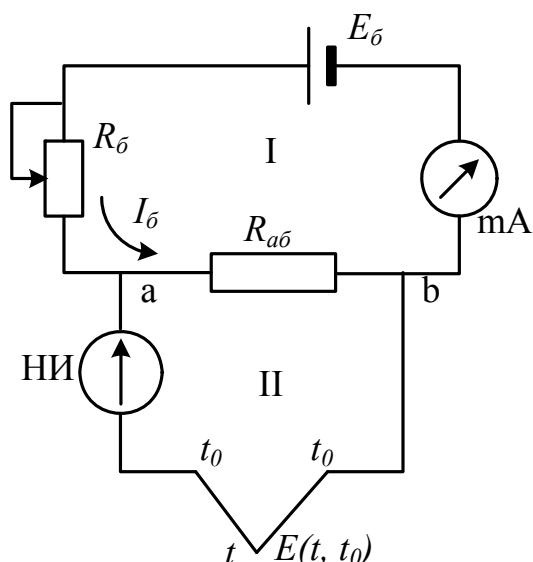


Рис. 2.18. Потенциометр с переменной силой рабочего тока

Движок последнего перемещается до тех пор, пока нуль-индикатор НИ в контуре II не покажет нуль, при этом отсчитывается значение тока I_{δ} по шкале миллиамперметра. Этот потенциометр уступает по точности потенциометру с постоянной силой рабочего тока.

Схема данного потенциометра находит применение, в частности, при построении нормирующих токовых преобразователей.

Автоматический потенциометр.

Схема этого прибора (рис.2.19) построена на основе схемы потенциометра с постоянной силой рабочего тока. Однако, здесь предусматривается два контура компенсации напряжения – II и III. Контур III, содержащий резистор R_m из медной проволоки, служит для автоматического введения поправки на температуру свободных концов ТЭП. Свободные концы ТЭП с помощью удлинительных проводов **F** и **D** подводятся к резистору R_m и находятся при одной с ним температуре. Остальные резисторы измерительной схемы потенциометра выполнены из манганина.

Для питания контуров II и III используется источник стабилизированного питания ИПС, в котором входное напряжение переменного тока 6,3 В выпрямляется и стабилизируется в выходное напряжение постоянного тока 5 В (погрешность стабилизации ± 5 или ± 10 мВ соответственно для класса точности 0,1 и 0,2) при нагрузке 1000 Ом и токе нагрузки $I = 5$ мА. При работе ИПС в составе потенциометра напряжения между точками **d** и **к** $U_{dk} = 1019$ мВ.

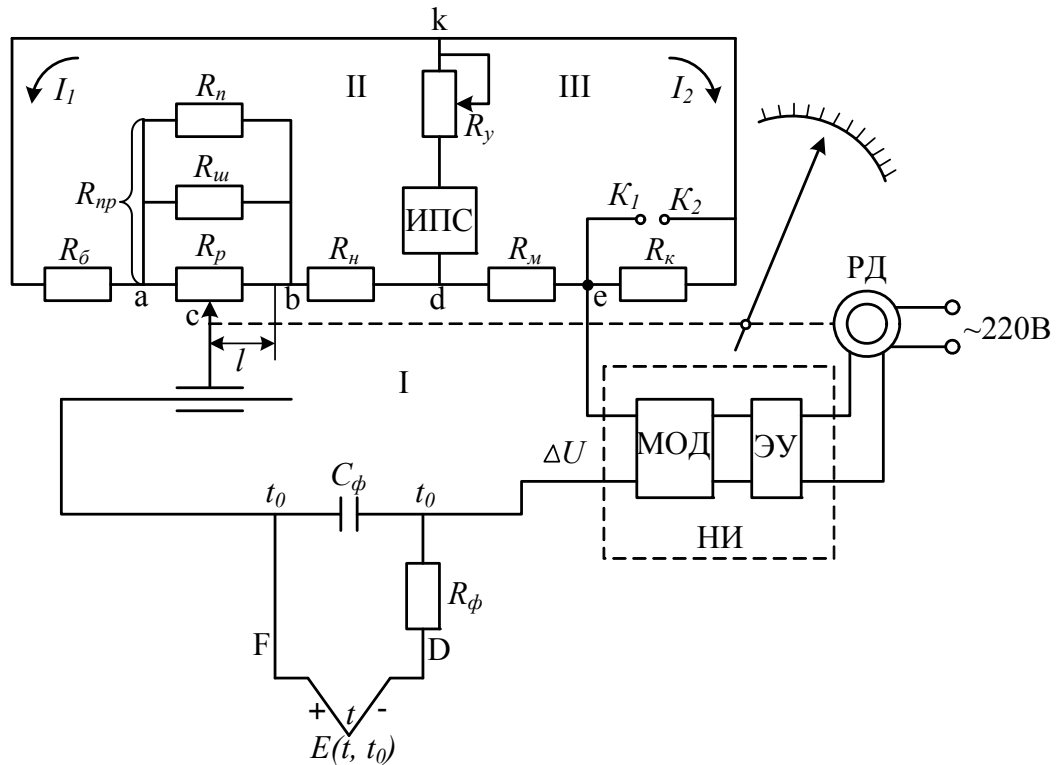


Рис. 2.19. Автоматический потенциометр

Благодаря использованию ИПС в автоматических потенциометрах установка рабочего тока осуществляется через несколько тысяч часов непрерывной работы, кроме того, упростилась кинематика механизма и повысилась надежность прибора.

Подключение к клеммам K_1 и K_2 нормального элемента $E_{нэ}$ и последовательно соединенного с ним нуль-индикатора осуществляется для контроля рабочего тока I лишь при проверке и градуировке потенциометра. При этом

$$U_{ке} = IR_K = E_{нэ}.$$

Обычно $R_K = 509,3$ Ом, тогда $I = 2$ мА.

R_y – резистор для установки рабочего тока; R_{np} – значения сопротивления реохордной группы, состоящей из трех параллельно соединяемых резисторов: R_p – реохорда, $R_{ш}$ – шунта и сопротивления R_n .

Такое исполнение реохордной группы связано с тем, что реохорд R_p является ответственным узлом, предназначенным для измерения. При необходимости изменения сопротивления на участке **ав** (обычно при изменении диапазона измерения) изменяют общее сопротивление R_{np} этого участка за счет изменения R_n , а иногда и $R_{ш}$, оставляя R_p стандартным. Резисторы R_n и R_{δ} служат для установления начального значения шкалы и значения тока $I = 3 \text{ mA}$.

В качестве нуль-индикатора НИ в автоматических потенциометрах используется электронный усилитель ЭУ, на входе которого установлен модулятор МОД для преобразования сигнала разбаланса напряжения постоянного тока ΔU в переменное напряжение. Для предохранения усилителя от наводок и помех, возникающих в цепи ТЭП, предусмотрен фильтр, состоящий из сопротивления R_{ϕ} и конденсатора C_{ϕ} .

Пусть при некотором значении измеряемой термо-ЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ в некотором положении движка реохорда **с** ток в контуре измерения Π равен 0, т.е. $E_{AB}(t, t_0)$ скомпенсировано падением напряжения U_{ce} на участке **cbde**. Тогда сигнал разбаланса

$$\Delta U = E_{AB}(t, t_0) - U_{ce} = 0.$$

При сигнале $\Delta U \neq 0$ на выходе усилителя в соответствии с абсолютным значением и знаком разбаланса формируется управляющий сигнал, под действием которого реверсивный двигатель РД перемещает движок реохорда **с** до тех пор, пока напряжение разбаланса не станет равным нулю; одновременно с движком по шкале реохорда перемещается стрелка прибора. Сведение к нулю напряжения разбаланса ΔU , т.е. достижение полного равенства компенсирующего напряжения U_{ce} измеряемой термо-ЭДС $E_{AB}(t, t_0)$, реализуется благодаря тому, что система автокомпенсации является астатической. Свойство астатичности достигается из-за наличия в системе регулирования разбаланса интегрирующего звена, в качестве которого выступает РД.

Нормирующие преобразователи термо-ЭДС.

Для введения информации от ТЭП в ЭВМ или системы автоматического регулирования применяют нормирующие измерительные токовые преобразователи (рис.2.20). Они предназначены для преобразования сигнала ТЭП в унифицированный сигнал постоянного тока 0-5 mA (0-20 mA).

В основу работы нормирующего преобразователя положен компенсационный метод измерения термо-ЭДС с использованием схемы потенциометра с переменной силой рабочего тока.

Контур измерения I содержит корректирующий мост КМ, усилитель Y_1 с токовым выходом $I_{вых}$ и резистор $R_{кн}$. К контуру I с помощью удлинительных проводов F и D подключен ТЭП.

Корректирующий мост предназначен для введения автоматической поправки на изменения температуры свободного конца ТЭП, а также компенсации начальной термо-ЭДС в преобразователях, нижний предел измерения которых не равен 0°C . К диагонали **ав** питания моста подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Резисторы R_1 , R_2 и R_3 – манганиновые, R_m – медный.

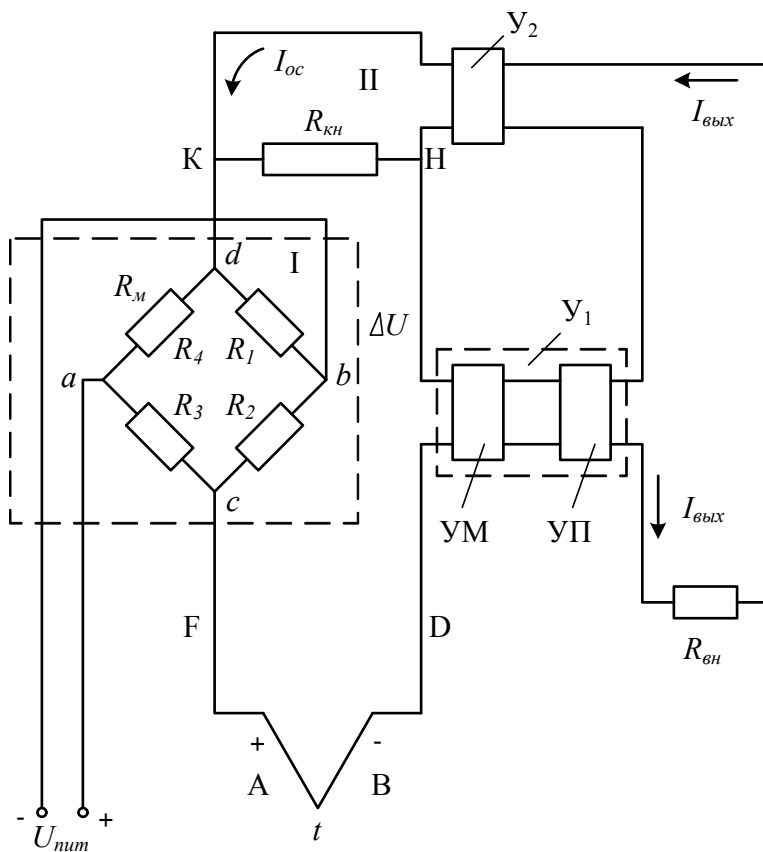


Рис.2.20. Нормирующий преобразователь термо-ЭДС

Усилитель Y_1 состоит из двух каскадов: магнитного УМ, выполненного по двухтактной полупериодической схеме и полупроводникового усилителя УП, работающего в режиме усиления постоянного тока. Усилитель Y_1 выполняет функции нуля-индикатора. Контур компенсации II включает в себя резистор $R_{кн}$ и усилитель обратной связи Y_2 . Этот усилитель аналогичен Y_1 , но включен с глубокой отрицательной связью по выходному току усилителя.

Выходной ток I_{oc} усилителя Y_2 является рабочим током контура II, и при прохождении этого тока по сопротивлению $R_{кн}$ в нем со стороны контура II создается компенсирующее напряжение: $U_{кн} = I_{oc} R_{кн}$. Со стороны контура I к резистору $R_{кн}$ подводится сигнал ТЭП $E_{AB}(t, t_0)$, сложенный с напряжением U_{cd} , создаваемым в измерительной диагонали **cd** корректи-

рующего моста КМ. Это напряжение равно поправке на температуру свободных концов ТЭП, т.е.

$$U_{cd} = E_{AB}(t_0'', t_0),$$

т.е. этот суммарный сигнал, равный

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0'') + U_{cd}$$

сравнивается с напряжением $U_{кн}$. Разбаланс, равный $\Delta U = E_{AB}(t, t_0) - U_{кн}$ подается на усилитель Y_1 , где этот сигнал постоянного тока ΔU преобразуется сначала в магнитном усилителе УМ в сигнал переменного тока, затем усиливается, а затем опять преобразуется в сигнал постоянного тока, который дополнительно усиливается в полупроводниковом усилителе УП постоянного тока.

Выходной сигнал усилителя Y_1 создает ток $I_{вых}$, который поступает во внешнюю цепь $R_{вн}$ и далее, через делитель, в усилитель обратной связи Y_2 . Выходной ток $I_{ос}$ усилителя Y_2 изменяется и изменяет падение напряжения $U_{кн}$ на резисторе $R_{кн}$ до тех пор, пока разбаланс ΔU не достигнет некоторой малой величины ΔU , называемой статической ошибкой компенсации.

Наличие статической ошибки компенсации приводит к тому, что в контуре измерения проходит недокомпенсированный ток. При этом, чем больше измеряемая термо-ЭДС, тем больше этот ток. Исключить эту ошибку в устройствах, выполненных по статической автокомпенсационной схеме, принципиально невозможно, так как выходной ток преобразователя $I_{вых}$ и ток контура компенсации $I_{ос}$ определяются наличием этой ошибки и пропорциональны ей. В то же время статическая ошибка автокомпенсационной схемы может быть значительно уменьшена, если использовать усилитель с большим коэффициентом усиления.

Рассмотрим связь между измеряемой термо-ЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ и выходным током преобразователя $I_{вых}$:

$$\Delta U = E_{AB}(t, t_0) - U_{кн} . \quad (2.27)$$

На выходах усилителей Y_1, Y_2 формируются сигналы

$$I_{вых} = K_1 I_{вх} = K_1 \frac{\Delta U}{R_{вх}} ; \quad (2.28)$$

$$I_{ос} = K_2 I_{вых} , \quad (2.29)$$

где K_1 и K_2 - коэффициенты усиления усилителей Y_1 и Y_2 ; $I_{\text{вх}} = \frac{\Delta U}{R_{\text{вх}}}$ - ток, создаваемый во входной цепи усилителя сигналом ΔU , $R_{\text{вх}}$ - сопротивление входной цепи усилителя Y_1 .

Падение напряжения на резисторе $R_{\text{кн}}$ с учетом (2.29) составит

$$U_{\text{кн}} = I_{\text{ос}} R_{\text{кн}} = K_2 I_{\text{вых}} R_{\text{кн}}. \quad (2.30)$$

Подставляя в выражение (2.27) ΔU из (2.28) и $U_{\text{кн}}$ из (2.30), получим:

$$\frac{I_{\text{вых}} R_{\text{вх}}}{K_1} = E_{AB}(t, t_0) - K_2 I_{\text{вых}} R_{\text{кн}}.$$

Находим

$$I_{\text{вых}} = K E_{AB}(t, t_0), \quad (2.31)$$

где $K = \frac{1}{R_{\text{вх}} / K_1 + K_2 R_{\text{кн}}}$ - коэффициент преобразования нормирующего преобразователя.

Таким образом, выходной сигнал нормирующего преобразователя пропорционален откорректированному по температуре свободного спая сигналу ТЭП.

В зависимости от диапазона входного сигнала нормирующие преобразователи имеют классы точности 0,5 – 1,5.

2.7. Термопреобразователи сопротивления

2.7.1. Принцип действия

Действие термопреобразователей сопротивления (термометров сопротивления) основано на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры.

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

ется при их нагревании. При этом температурный коэффициент электрического сопротивления полупроводников на порядок выше, чем у чистых металлов.

Если известна зависимость между электрическим сопротивлением R_t термопреобразователя сопротивления и его температурой t (т.е. $R_t=f(t)$ - градуировочная характеристика), то, измеряя R_t , можно определить температуру среды.

Статическая характеристика металлических термометров сопротивления может быть записана в виде формулы:

$$R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)], \quad (2.32)$$

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

Градуировочные характеристики термометров сопротивления приводятся в справочниках (см. Приложения 1, 2).

Термометры сопротивления широко применяются для измерения температуры в интервале от -260 до 850 °C. В отдельных случаях они могут быть использованы для измерения температур до 1000 °C.

К числу достоинств металлических термометров сопротивления следует отнести:

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

К недостаткам термометров сопротивления относится потребность в постоянном источнике тока.

2.7.2. Типы термопреобразователей сопротивления

К металлическим проводникам термопреобразователя сопротивления предъявляется ряд требований:

- 1) стабильность градуировочной характеристики;
- 2) воспроизводимость, обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых термопреобразователей сопротивления;
- 3) нечувствительность к малым примесям;

- 4) линейность функции $R_t = f(t)$;
- 5) высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления;
- 6) большое удельное сопротивление;
- 7) невысокая стоимость материала.

Исследования установили, что чем чище металл, тем более он отвечает указанным требованиям и тем больше отношение R_{100} / R_0 и температурный коэффициент электрического сопротивления α , где R_{100} и R_0 - сопротивления материала при температуре 100 и 0°C соответственно. При снятии механических напряжений в металле путем его отжига, эти характеристики достигают максимального значения для данного металла.

Из числа чистых металлов наиболее пригодными для изготовления термометров сопротивления являются платина (Pt) и медь (Cu), хотя выпускаются термометры сопротивления, выполняемые из никеля, железа, свинца, вольфрама, но в нашей стране они не получили широкого распространения.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 6651-94 «Термопреобразователи сопротивления. Общие технические условия» введен в действие в качестве государственного стандарта РФ с 1 января 1999 г. В стандарте нормализованы требования к трем типам преобразователей (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Типы и характеристики термопреобразователей сопротивления

Тип термопреобразователя	Номинальное сопр. R_0 при 0°C (Ом)	Условное обозначение градуировочной характеристики		Диапазон измеряемых температур (°C)
		в РФ	Международная	
Термометр сопротивления платиновый (ТСП)	1	1П	Pt1	-200 ÷ 850
	10	10П	Pt10	
	50	50П	Pt50	
	100	100П	Pt100	
	500	500П	Pt500	
Термометр сопротивления медный (ТСМ)	10	10М	Cu10	-200 ÷ 200
	50	50М	Cu50	
	100	100М	Cu100	
Термометр сопротивления никелевый (ТСН)	100	100Н	Ni100	-60 ÷ 180

Платина является наилучшим материалом для термометров сопротивления, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент $\alpha = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ и высокое удельное сопротивление $\rho = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Платиновые термометры сопротивления используются в качестве рабочих образцов эталонов. Недостатком платины является нелинейность функции $R_t = f(t)$, кроме того, платина очень дорогой металл.

Медь - недорогостоящий материал, легко получаемый в чистом виде, но при высоких температурах медь быстро окисляется.

2.7.3. Конструкция термопреобразователей сопротивления

Термопреобразователи сопротивления имеют специальную арматуру, сходную, в основном, с арматурой термопар. Так же, как и у термопар, в существующее номенклатуре представлено большое количество различных вариантов конструктивного исполнения термометров сопротивления. На рис 2.21 представлена конструкция термометра сопротивления, которая чаще всего используется для измерения температуры в трубопроводах и других аппаратах, находящихся под давлением.

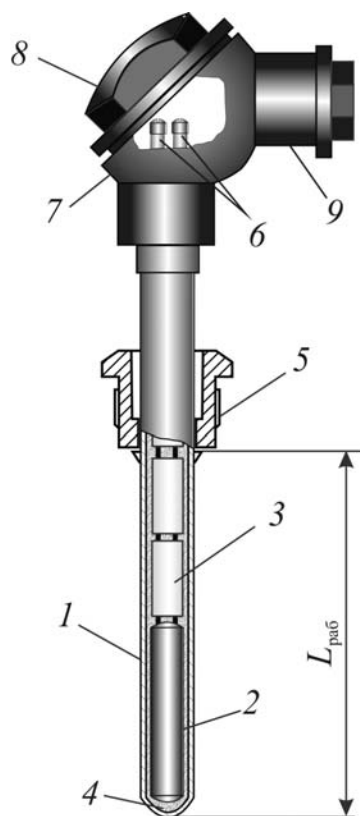


Рис. 2.21. Конструкция термопреобразователя сопротивления:

1 – защитный чехол; 2 – чувствительный элемент; 3 – изоляционные бусы; 4 – порошок; 5 – штуцер; 6 – розетка с клеммами; 7 – головка; 8 – крышка; 9 – штуцер под кабель

Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, чувствительный элемент 2 и удлиняющие провода, армированные изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру. Арматура состоит из защитного чехла 1, неподвижного или передвижного штуцера 5 с сальниковым уплотнением (на рисунке не показано) и головки 7, прочно присоединенной к защитному чехлу. В головке, снабженной крышкой 8 и штуцером под кабель 9, помещена розетка 6 из изоляционного материала с клеммами для присоединения удлиняющего кабеля, соединяющего термометр сопротивления с измерительным прибором или преобразователем. В качестве изоляции удлиняющих проводов термометра применяются одно- или двухканальные трубки или бусы 3, выполненные из фарфора или ПВХ. Свободное пространство защитного чехла заполнено порошком окиси алюминия 4 для улучшения теплопередачи.

На рис. 2.22 показана конструкция чувствительного элемента платинового и медного термометров сопротивления. Чувствительный элемент платинового термометра сопротивления (рис. 2.22, а) представляет собой платиновую спираль 1 из тонкой проволоки, помещенную в капиллярные каналы керамического каркаса 4. К двум верхним концам этих спиралей припаяны платиновые или иридиевородиевые выводы 2, к которым привариваются удлиняющие проводники. Для крепления платиновых спиралей и выводов в керамическом каркасе используют глазурь или термоцемент 3. Пространство между платиновыми спиралью и стенками каналов каркаса заполнено порошком окиси алюминия, который служит изолятором и улучшает тепловой контакт между спиралью и каркасом.

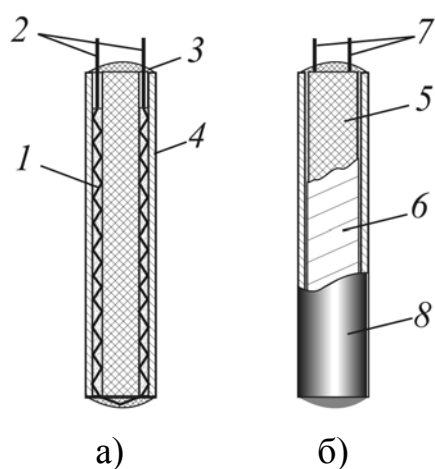


Рис.2.22. Конструкция чувствительного элемента:

а – платинового ТС; б – медного ТС.
1 – платиновая спираль; 2, 7 – выводы; 3 – термоцемент; 5 – медная проволока; 6 – фторопластовая пленка; 8 – металлическая гильза

Чувствительный элемент медного термометра сопротивления (рис. 2.22, б) представляет собой многослойную безиндукционную обмотку 5 из медной изолированной проволоки (диаметром 0,08 мм), намотанную на цилиндрический каркас из пластмассы и герметизированную с помощью фторопластовой пленки 6 (или слоя лака). К концам обмотки припаяны медные выводы 7. Собранный чувствительный элемент помещается в металлическую гильзу 8, засыпается керамическим порошком и герметизируется.

Длина чувствительного элемента у платиновых термометров сопротивления составляет 30 – 120 мм, у медных – 60 мм.

Термометры сопротивления бывают одинарные и двойные, т.е. с одним и двумя чувствительными элементами. В последнем случае в общем защитном чехле расположены два одинаковых чувствительных элемента, подключаемых к двум отдельным вторичным приборам, установленным в разных местах.

2.7.4. Вторичные приборы, работающие в комплекте с термопреобразователями сопротивления

В практике технических измерений температуры с использованием термопреобразователей сопротивления широкое применение нашли мосты (уравновешенные и неуравновешенные), логометры и нормирующие преобразователи. Для точных измерений температуры и метрологической аттестации термопреобразователей сопротивления получили применение мосты постоянного тока.

Логометр.

Это приборы магнитоэлектрической системы. Логометр (рис.2.23) состоит из двух жестко закрепленных между собой рамок, изготовленных из медной проволоки, сопротивлением r_1 и r_2 . На общую ось рамок насажена стрелка прибора.

В воздушном кольцевом зазоре между цилиндрическим наконечником из мягкой стали и полюсными наконечниками вращаются активные стороны рамок. Воздушный зазор между полюсными наконечниками и сердечником неравномерен и поэтому магнитное поле здесь распределено неравномерно. Так, зазор по горизонтальной оси минимален и увеличивается по обе стороны от этой оси. В соответствии с этим магнитная индукция в центре максимальна и уменьшается примерно по квадратичному закону по мере удаления от центра к краям полюсных наконечников. Таким

образом, магнитная индукция является функцией угла поворота рамок, т.е. токи I_1 и I_2 , проходящие соответственно в рамках r_1 и r_2 , направлены так, что возникающие в них моменты M_1 и M_2 направлены навстречу друг другу:

$$M_1 = C_1 B_1 I_1; \quad M_2 = C_2 B_2 I_2, \quad (2.33)$$

где C_1, C_2 - постоянные коэффициенты, зависящие от геометрии рамок; B_1, B_2 - магнитная индукция, пронизывающая рамки.

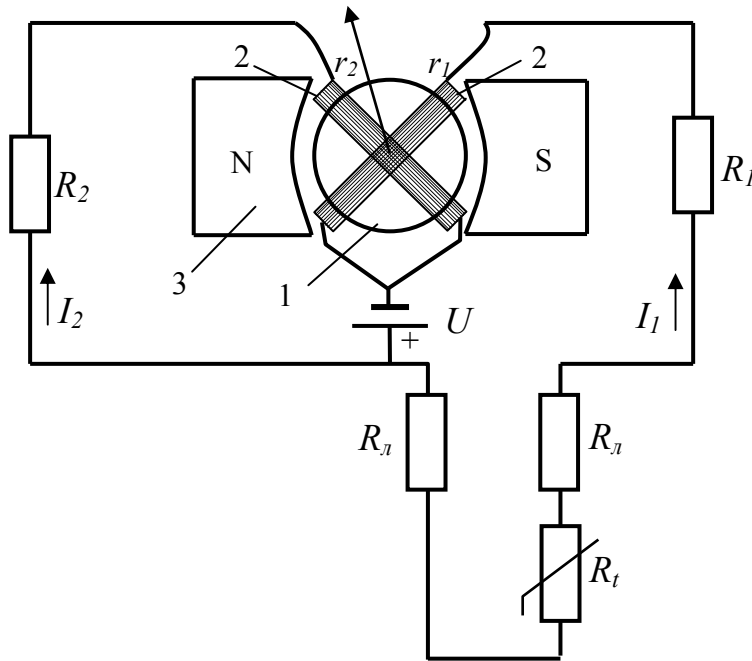


Рис.2.23. Логометр:

1 – сердечник; 2 – рамки; 3 – магнит

В логометре уравнивание момента, действующего в одной из рамок, происходит за счет момента другой рамки. Для исключения погрешности измерения токопроводы рамок выполняют безмоментными, например, из тонкой золотой ленты или маломоментными - из бронзовой проволоки малого диаметра.

Пусть при изменении сопротивления R_t увеличился ток I_1 , что приводит к увеличению момента M_1 , который начинает поворачивать подвижную систему против часовой стрелки. При этом окажется, что активные стороны рамки r_1 будут перемещаться из поля большей магнитной напряженности в поле с меньшей напряженностью. Активные стороны рамки r_2 , наоборот, из поля меньшей магнитной напряженности в поле с большей напряженностью. При этом момент M_1 будет уменьшаться, а M_2 - расти, вследствие уменьшения B_1 и роста B_2 . При некотором угле поворота подвижной системы наступит состояние равновесия, т.е.

$$M_1 = M_2,$$

$$C_1 I_1 B_1 = C_2 I_2 B_2,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{C_2 B_2}{C_1 B_1} = C \frac{B_2}{B_1} = f(\varphi)$$

или $\varphi = f(I_2/I_1)$.

Из этого следует, что угол поворота подвижной системы определяется отношением (по-гречески "логус") двух токов, что объясняет название прибора - логометр.

Выражая токи I_1 и I_2 через напряжение питания U и соответствующие сопротивления, имеем:

$$\varphi = f\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = f\left(\frac{U/(r_2 + R_2)}{U/(R_t + r_1 + R_1)}\right) = f\left(\frac{R_t + r_1 + R_1}{r_2 + R_2}\right), \quad (2.34)$$

$r_1, R_1, r_2, R_2 = \text{const}$, поэтому $\varphi = f(R_t)$.

Таким образом, логометр измеряет отношение токов, генерируемых одним источником. Изменение его напряжения в определенных пределах не влияет на показания прибора. Это его преимущество.

Так как рамки выполнены из меди, то при изменении температуры окружающей среды сопротивление рамок меняется. Для уменьшения влияния температуры последовательно с сопротивлениями r_1 и r_2 рамок включены добавочные резисторы R_1 и R_2 , выполненные из манганина. Зна-

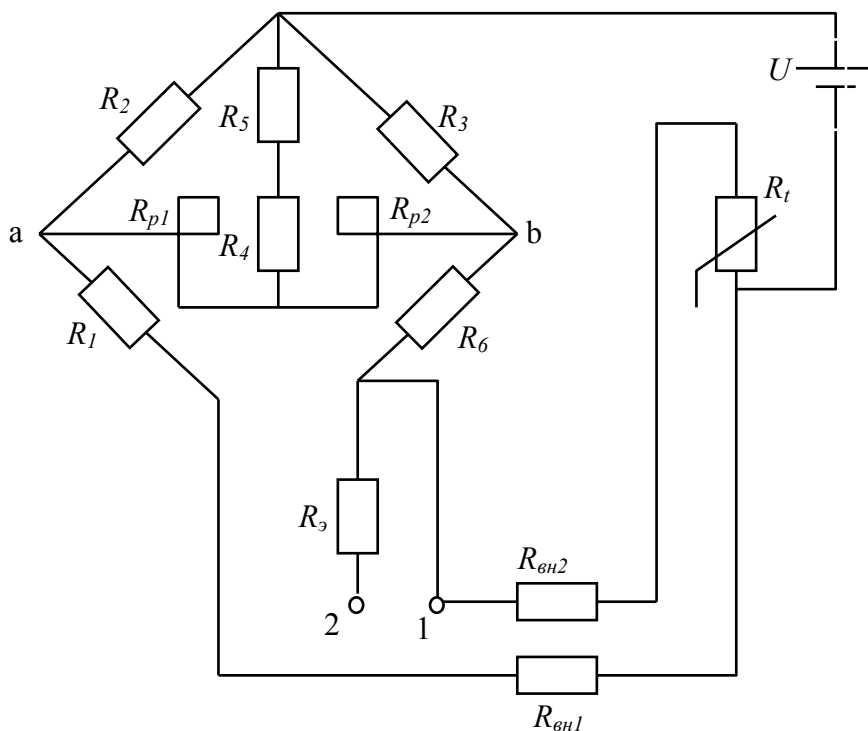


Рис.2.24. Схема подключения логометра

чение сопротивлений R_1 и R_2 много больше сопротивлений r_1 и r_2 рамок. Но при этом из-за уменьшения токов уменьшается чувствительность логометра. Для увеличения чувствительности логометра и уменьшения температурного коэффициента используют схему симметричного неравновесного моста, в диагональ которого включены рамки логометра (рис.2.24).

Рамки логометра включены в диагональ моста, составленного из постоянных манганиновых резисторов R_1, R_2, R_3 и R_6 и термометра сопротивления R_t . Средняя точка

между рамками соединена через последовательно включенные медный резистор R_5 и манганиновый R_4 с вершиной моста, к которой подведен один провод источника питания, второй провод источника питания подключен к противоположной вершине. Резистор R_4 - сопротивление для изменения пределов измерения (угла отклонения подвижной системы), а R_5 - для температурной компенсации.

Для обеспечения наибольшей чувствительности мостовая схема симметрична, т.е. $R_2=R_3$. Резистор R_1 выбран так, чтобы мост находился в равновесии при сопротивлении термометра сопротивления R_t , соответствующему значению температуры в середине шкалы прибора. При этом из-за равенства потенциалов на вершинах моста **a** и **b** падение напряжения на резисторах R_2 и R_3 , а значит и силы токов в рамках R_{p1} и R_{p2} равны, и обе рамки располагаются в магнитном поле симметрично относительно оси полюсных наконечников.

При увеличении сопротивления термометра сила тока I_2 в рамке R_{p2} уменьшится, а в рамке R_{p1} соответственно увеличится. При уменьшении сопротивления термометра произойдет обратное явление, то есть I_2 увеличится, а I_1 уменьшится.

Под действием возникающей в обоих случаях разности вращающих моментов, магнитная система поворачивается вправо или влево до наступления нового равновесия. Из головки термометра выходит три провода: два из них через уравнивательные манганиновые катушки $R_{вн1}$, $R_{вн2}$, а третий подсоединен к источнику питания. Этот провод, входящий в диагональ питания моста не имеет уравнивательной катушки, так как сопротивление провода не сказывается на работе логометра.

Таким образом, плечи $R_1+R_{вн1}$ и $R_t+R_{вн2}+R_6$ смежные, следовательно изменение сопротивления соединительных проводов из-за изменения температуры окружающей среды почти не влияет на результаты измерения. При проверке правильности подгонки сопротивления соединительных проводов их закорачивают на зажимах головки термометра и вместо R_t включают R_9 , для чего провод, подводящий ток к зажиму 1, подключают к зажиму 2. В этом случае при включении питания стрелка логометра должна остановиться на контрольной отметке.

Одинаковое изменение сопротивления рамок логометра при изменении температуры окружающей среды не влияет на показание прибора только при равновесии мостовой схемы. Температурную погрешность прибора компенсируют соответствующим выбором резистора R_5 .

Если температура t отличается от градуировочной t_o , то

$$R_5 = R_5^o [1 + \alpha(t - t_o)],$$

где R_5^o - сопротивление резистора при температуре градуировки; α - температурный коэффициент электрического сопротивления меди.

Сопротивление резистора

$$R_5^o = \frac{R_p^o ((2R + R_1 + R_t)R_4 + R^2)}{R(R_1 + R_t)}, \quad (2.36)$$

где $R = R_2 = R_3$, R_p^o - сопротивление рамок логометра при температуре t_o .

При известных R_p^o , R , R_4 , R_1 и R_t можно определить R_5^o , а следовательно R_5 для диапазона $(t_o \div t)$. В формулу входит R_t , поэтому полную компенсацию температурной погрешности можно получить для двух определенных значений R_t .

Эта схема позволяет для логометров класса точности 1,5 иметь дополнительную погрешность не более $\pm 0,75\%$ от значения диапазона измерения на каждые 10°C изменения температуры окружающей среды в пределах от 5 до 50°C . Классы точности промышленных логометров 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5.

Уравновешенные мосты.

Уравновешенные мосты подразделяются на неавтоматические и автоматические. В них используется нулевой метод измерения. С помощью **неавтоматических мостов**, используемых в лабораторных условиях, измеряют сопротивления от 0,5 до 10 Ом.

Диагональ **ab** содержит источник тока (рис.2.25), а диагональ **cd** - нуль-индикатор НИ. В плечи моста включены постоянные сопротивления R_1 , R_2 и регулируемое сопротивление R_3 , а плечо **cd** содержит измеряемое сопротивление R_t и два соединительных провода, каждый сопротивлением R_n .

Если мост уравновешен, то в диагонали **cd** ток равен нулю, а токи в соответствующих плечах равны, т.е. $I_1 = I_2$, $I_3 = I_t$ или

$$I_1 R_1 = I_3 R_3 \text{ и } I_2 R_2 = I_t (R_t + 2 R_n), \quad (2.37)$$

так как потенциалы точек **c** и **d** равны. Разделив два последние равенства друг на друга получим:

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_3}{I_t (R_t + 2 R_n)}.$$

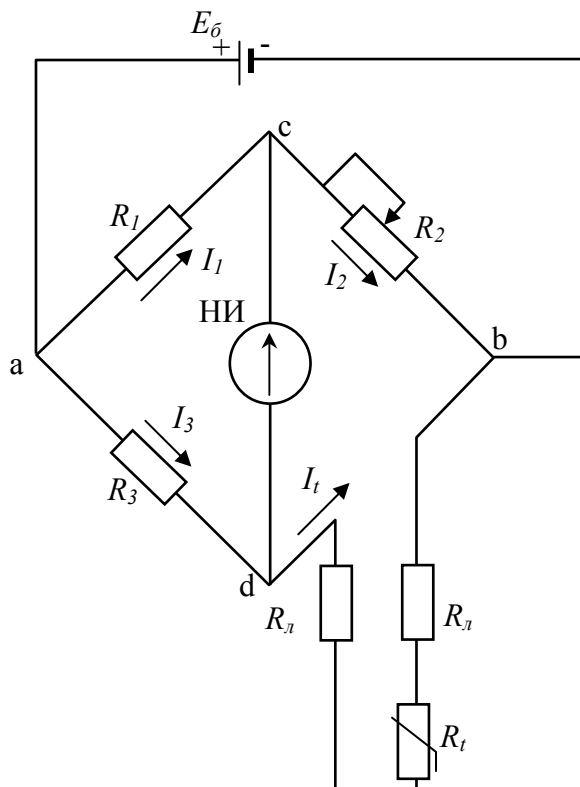


Рис. 2.25. Уравновешенный неавтоматический мост

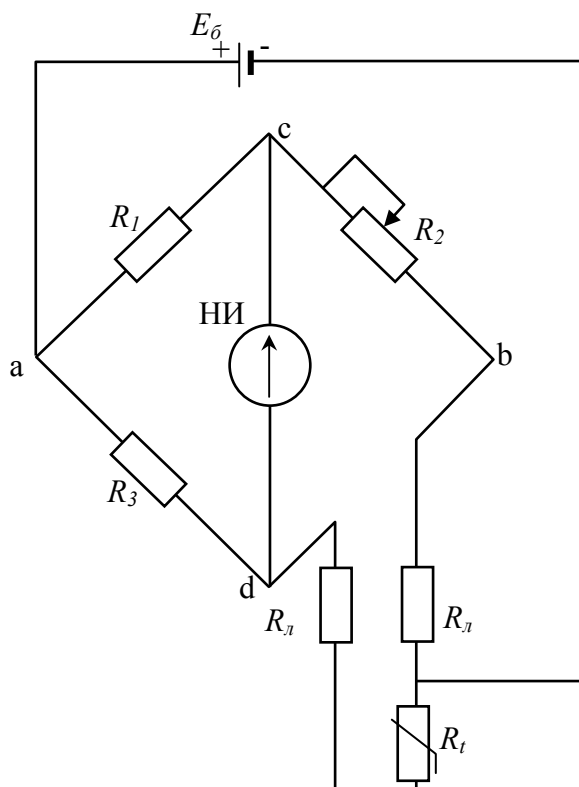


Рис. 2.26. Трехпроводная схема подключения термометра сопротивления к уравновешенному мосту

Учитывая равенство токов

$$R_1(R_t + 2R_l) = R_2R_3. \quad (2.38)$$

Это уравнение выражает условие равновесия моста, которое достигается путем регулирования сопротивления резистора R_2 до тех пор, пока нуль-индикатор не покажет нуль.

$$\text{Отсюда } R_t = R_2 \frac{R_3}{R_1} - 2R_l.$$

При $R_3/R_l = \text{const}$ и $R_l = \text{const}$ $R_t = \kappa R_2$.

R_l меняется с изменением температуры окружающей среды, что приводит к искажению результата измерения. Этот недостаток может быть устранен путем **трехпроводного подключения термопреобразователей сопротивления** к мосту (рис.2.26). При этом соединении питающая диагональ доводится (точка **b**) до термометра сопротивления. В результате этого соединения провода оказываются разнесенными к двум плечам моста: одно из R_l - к сопротивлению R_2 , а другое - к R_t . Тогда условие равновесия моста имеет вид:

$$R_3(R_2 + R_l) = R_1(R_t + R_l),$$

откуда

$$R_t = (R_2 + R_l) \frac{R_3}{R_1} - R_l. \quad (2.39)$$

При симметричном мосте ($R_1 = R_3$) $R_t = R_2$, т.е. результат измерения не зависит от R_l . В других

случаях влияние изменения $R_{\text{л}}$ незначительно.

Недостатком уравновешенных мостов, собранных по этой схеме, является неопределенность в измерении, которое вносит переходное сопротивление контакта в регулируемом плече R_2 . Для устранения этого недостатка подвижный контакт располагают в измерительной диагонали, при этом регулируемое сопротивление оказывается размещенным в двух плечах. Таким образом, при уравнивании моста путем перемещения контакта изменяется сопротивление сразу обеих плеч, а переходное сопротивление контакта, располагаемое в измерительной диагонали из-за отсутствия тока в момент уравнивания, не сказывается на результатах измерения.

Достоинством уравновешенных мостов является независимость их показаний от напряжения питания.

В последнее время широкое распространение получают **четырепроводные схемы включения термометра сопротивления** (рис.2.27).

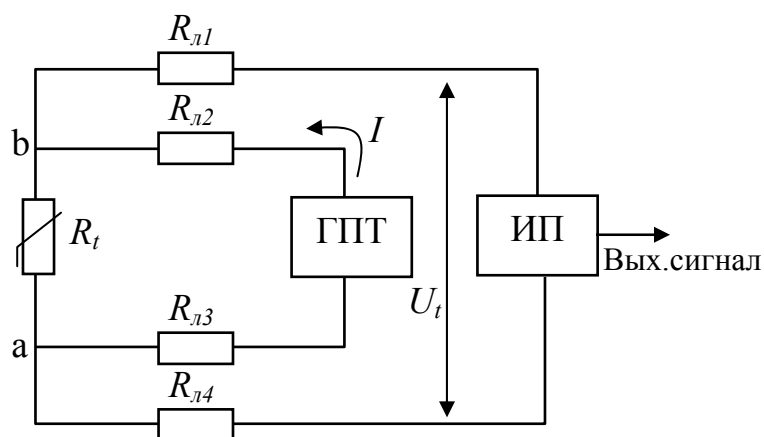


Рис. 2.27. Четырепроводная схема подключения термометра сопротивления

Ток I от генератора постоянного тока ГПТ протекает по сопротивлению R_t и создает на нем падение напряжения $U_t = R_t I$, которое в измерительном преобразователе ИП и преобразуется в выходной сигнал. Поскольку в данной схеме измеряется разность

потенциалов между точками **а** и **б**, то падения напряжения на сопротивлениях $R_{\text{л}2}$, $R_{\text{л}3}$ не оказывает влияния на результат измерения. При достаточно высоком значении входного сопротивления ИП ($R_{\text{вх}} \gg R_{\text{л}1} + R_{\text{л}4}$) влиянием сопротивлений линий $R_{\text{л}1}$, $R_{\text{л}4}$ можно пренебречь. Итак, схема обеспечивает независимость результатов измерения от изменения сопротивления линии связи. Недостатком такой схемы является необходимость изоляции от земли либо ГПТ, либо измерительного преобразователя. Для устранения данного недостатка могут использоваться и другие, более сложные, схемы подключения термометров сопротивления к измерительному преобразователю с четырехпроводной линией связи.

Следует учесть, что если измерительный прибор рассчитан на четырехпроводную схему, то датчик к нему можно подключить и по двухпроводной схеме. При этом дополнительная погрешность измерения, вызванная влиянием соединительных проводов, будет иметь величину порядка $(R_{л2} + R_{л3}) / R_t$.

Автоматический уравновешенный мост собран по схеме (рис. 2.28) с переменным сопротивлением плеч и трехпроводным подключением термометра сопротивления. Переменное сопротивление содержит три параллельно соединенных резистора: R_p - реохорд, выполняющий измерительные функции; $R_{ш}$ - шунт реохорда; R_n - резистор для подгонки заданного значения параллельного соединения сопротивлений всей реохордной группы; R_{np} , R_1 , R_2 , R_3 - резисторы мостовой схемы; R_δ - резистор добавочный для подгонки тока из условия минимума самонагрева термометра сопротивления; R_δ - резистор балластный в цепи питания для ограничения тока; R_t - термопреобразователь сопротивления; P_l - резистор для подгонки сопротивления соединительной линии; m - положение движка реохорда правее точки **d** в долях от R_{np} (переменное сопротивление); n - положение движка реохорда левее точки **d** в долях от R_{np} .

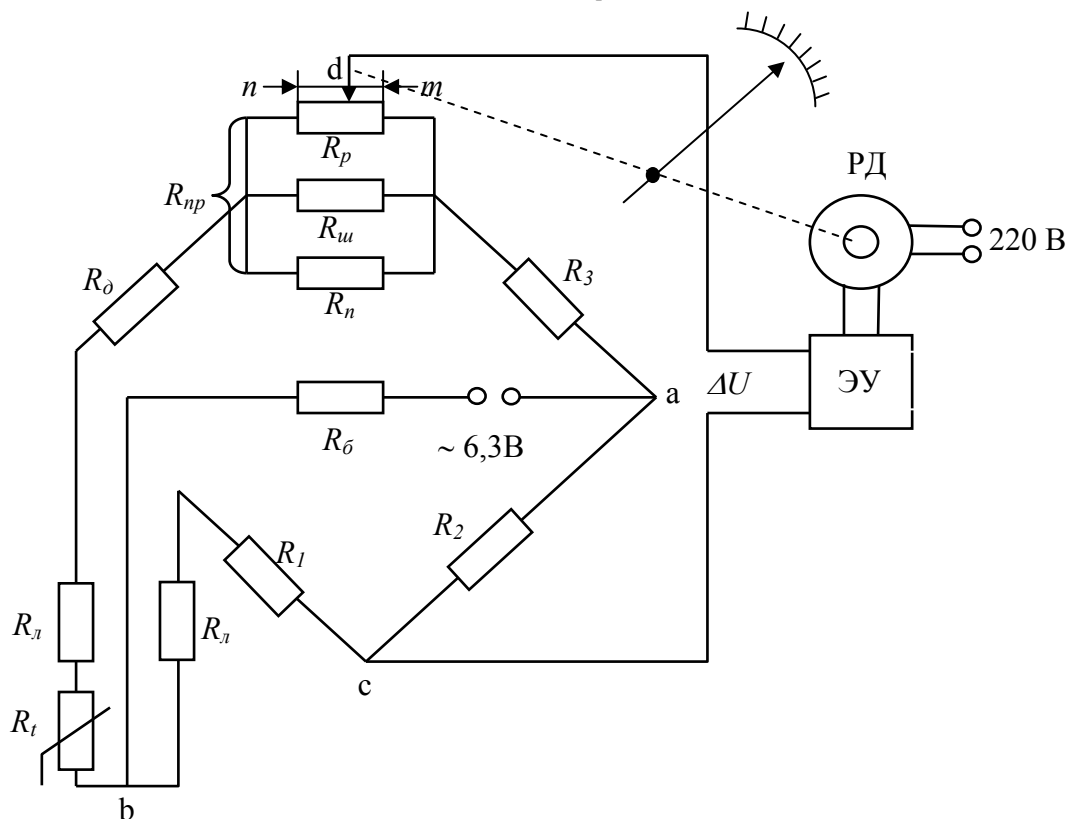


Рис.2.28. Автоматический уравновешенный мост

Для получения линейной зависимости положения движка реохорда от изменения сопротивления резистора R_t , последний включается в плечо, прилежащее к реохорду. В качестве нуля - индикатора НИ в автоматических мостах используется электронный усилитель ЭУ. Автоматические мосты питаются как переменным, так и постоянным током. В последнем случае на входе ЭУ устанавливается модулятор.

При изменении температуры t изменяется сопротивление R_t и мост выходит из равновесия, т.е. в диагонали **cd** появляется напряжение разбаланса ΔU , которое усиливается усилителем ЭУ до значений, достаточных для вращения ротора РД в соответствующую сторону, в зависимости от знака разбаланса. Вал РД, связанный с движком реохорда, перемещает его до тех пор, пока разбаланс ΔU не станет равным нулю. Одновременно с движком перемещается каретка с пером и стрелкой, указывающей по шкале положение m движка (значение измеряемой температуры). При изменении t от $\min$ до $\max$ значения движок перемещается из одного крайнего положения в другое.

Пусть при температуре, соответствующей начальному значению шкалы прибора, измеряемое сопротивление R_t равно $R_{нач}$, а при изменении температуры: $R_t = R_{нач} + \Delta R_t$.

Условие равновесия для этих двух случаев можно представить в виде:

$$(R_{нач} + R_l + R_o + R_{np})R_2 = (R_l + R_l)R_3 \quad (2.40)$$

и

$$(R_{нач} + R_l + R_o + R_{np} + \Delta R_t - mR_{np})R_2 = (R_l + R_l)(R_3 + mR_{np}). \quad (2.41)$$

Вычитая из (2.41) (2.40) и решая относительно m , получим:

$$m = \Delta R_t \frac{R_2}{R_{np}(R_l + R_l + R_2)}.$$

Отсюда видно, что m - линейная функция ΔR_t , а также, несмотря на трехпроводную схему соединения термометров сопротивления с мостом, показания последнего зависят от изменения сопротивления соединительных проводов. Однако эта зависимость незначительна и при изменении температуры до 40°C изменение сопротивления проводов R_l приводит к изменению показаний прибора в пределах (0,05-0,1)% от нормирующего значения измеряемой величины для различных диапазонов измерения.

Полностью отсутствует влияние сопротивления соединительных проводов при симметричном мосте, т.е. когда

$$R_I = R_t + R_\partial + R_{np} - mR_{np}.$$

Так как это условие может быть выполнено для одной температуры, то обычно его выполняют для температуры t_{cp} , соответствующей середине шкалы. При этом $R_I \approx (R_{t_{cp}} + R_\partial + R_{np})/2$.

Выпускаемые автоматические мосты отличаются друг от друга назначением, конструкцией, размерами, точностью измерения и другими техническими характеристиками, но измерительная схема их включения незначительно отличается от схемы, приведенной на рис.2.27. Классы точности мостов 0,25; 0,5; 1, а время пробега стрелки всей шкалы 1; 2,5 и 10 с. В автоматические мосты встраиваются электронные и пневматические регулирующие устройства и устройства сигнализации; для дистанционной передачи показаний - преобразователи пневматические, токовые, частотные и др.

Нормирующие преобразователи для термопреобразователей сопротивления.

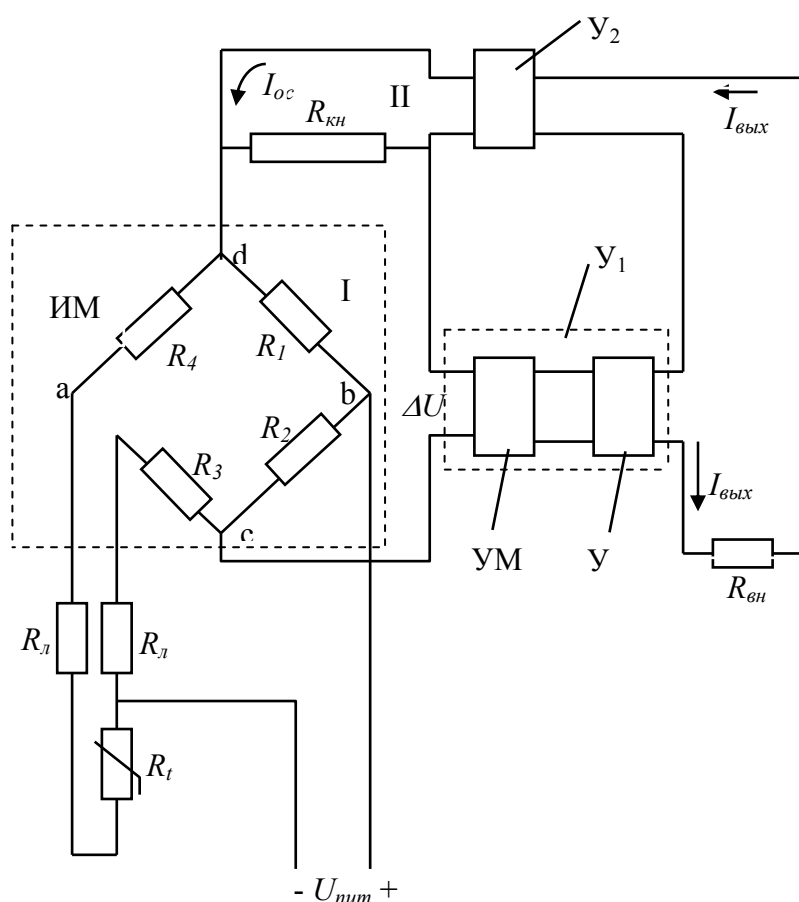


Рис.2.29. Нормирующий преобразователь

Для введения информации, получаемой с помощью термопреобразователя сопротивления, в ЭВМ или САР используют нормирующие токовые преобразователи (рис. 2.29), формирующие на своем выходе сигнал постоянного тока 0...5 мА (0...20 мА).

Этот преобразователь по схеме и принципу действия аналогичен нормирующему преобразователю, работающему в комплекте с ТЭП (см. раздел 2.6.9).

Отличие заключается в том, что вместо корректирующего моста КМ используется измерительный неравновесный мост ИМ, в одно из плеч которого по трехпроводной схеме подсоединен термопреобразователь сопротивления R_t . Сопротивление R_d служит для подгонки сопротивления соединительных проводов к номинальному значению. К диагонали питания моста **ав** подведено стабилизированное напряжение постоянного тока.

Выходящий ток преобразователя $I_{\text{вых}}$ пропорционален напряжению U_{cd} в измерительной диагонали моста, и соотношение между ними

$$I_{\text{вых}} = K U_{cd}.$$

Так как $U_{cd} = K_m R_b$, где K_m - коэффициент преобразования моста, то $I_{\text{вых}} = K K_m R_t$, т.е. токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален сопротивлению термопреобразователя сопротивления.

2.8. Бесконтактные методы измерения температуры

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем больше энергии оно излучает. Тепловые лучи испускаются всеми нагретыми физическими телами, которые при температурах около 500 - 600°C начинают испускать излучение, видимое человеческим глазом, причем яркость свечения нагретых тел быстро возрастает с повышением температуры.

Накаленные твердые тела испускают сплошной спектр излучения, состоящий из электромагнитных волн различной длины. Видимое человеческим глазом электромагнитное излучение, называемое светом, представляет собою лишь весьма узкий диапазон спектра шириной 0,35 мкм с длинами волн от 0,40 до 0,75 мкм. Невидимые лучи с большей длиной волны (более 0,75 мкм) относятся к инфракрасному участку спектра излучения, охватывающему диапазон от 0,75 до 400 мкм, за которым инфракрасный участок спектра постепенно переходит в диапазон радиоволн. Невидимые лучи с меньшей длиной волны (менее 0,40 мкм) относятся к ультрафиолетовому участку спектра излучения.

В области температурных измерений используют в основном диапазон инфракрасных и видимых лучей.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют **пирометрами**. Они позволяют контролировать температуру от 100 до 6000°C и выше. Одним из главных достоинств данных устройств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле

нагретого тела, так как в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Поэтому данные методы получили название бесконтактных.

Все приборы, измеряющие температуру бесконтактным методом, т.е. дистанционно, обладают следующими преимуществами по сравнению с приборами, измеряющими температуру контактными методами:

- 1) имеют принципиально неограниченный верхний температурный предел измерения;
- 2) обеспечивают возможность измерения температур излучателей, находящихся на большом расстоянии от пирометра;
- 3) не искажают температурное поле объекта измерения;
- 4) могут применяться для измерения температур газовых потоков при больших скоростях.

На основании законов излучения разработаны пирометры следующих типов:

1. пирометр частичного излучения (ПЧИ) – измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
2. пирометр спектрального отношения (ПСО) – измеряется отношение энергии фиксированных участков спектра;
3. пирометр суммарного излучения (ПСИ) – измеряется полная энергия излучения;

В зависимости от типа пирометра различаются яркостная, цветовая и радиационная температуры.

Яркостной температурой реального тела T_y называют температуру, при которой плотность потока спектрального излучения абсолютно черного тела равна плотности потока спектрального излучения реального тела для той же длины волны (или узкого интервала спектра) при действительной температуре T_d .

Цветовой температурой реального тела T_c называют температуру, при которой отношения плотностей потоков излучения абсолютно черного тела для двух длин волн λ_1 и λ_2 равно отношению плотностей потоков излучений реального тела для тех же длин волн при действительной температуре T_d .

Радиационной температурой реального тела T_r называют температуру, при которой полная мощность абсолютно черного тела равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре T_d .

2.8.1. Пирометры частичного излучения

К данному типу пирометров, измеряющих яркостную температуру объекта, относятся оптические (квазимонохроматические) и фотоэлектрические пирометры, измеряющие энергию потока в узком диапазоне длин волн.

Наиболее распространенным прибором этой группы является квазимонохроматический пирометр с исчезающей нитью (рис. 2.30).

Принцип действия квазимонохроматических пирометров основан на сравнении яркости монохроматического излучения двух тел: эталонного тела и тела, температуру которого измеряют. В качестве эталонного тела обычно используют нить лампы накаливания, яркость излучения которой регулируют.

Пирометр представляет собой телескопическую трубку с линзой 1 объектива и линзой 4 окуляра. Внутри телескопической трубки в фокусе линзы объектива находится лампа накаливания 3 с подковообразной нитью.

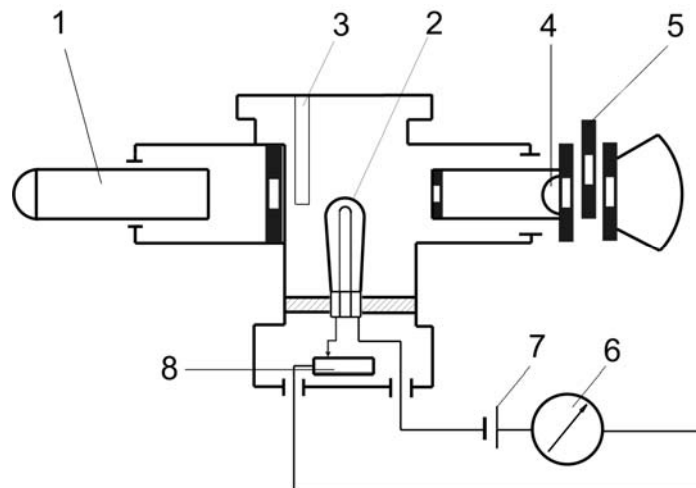


Рис.2.30. Принципиальная схема квазимонохроматического (оптического) пирометра с исчезающей нитью:

1-линза; 2-поглощающий светофильтр; 3-лампа накаливания; 4-линза окуляра; 5-красный светофильтр; 6-милливольтметр; 7-источник тока; 8-реостат

Лампа питается от источника тока 7 через реостат 8. В цепь питания лампы включен милливольтметр 6, конструктивно объединенный с трубкой телескопа. Шкала милливольтметра отградуирована в градусах температуры. Для получения монохроматического света окуляр снабжен красным светофильтром 5, пропускающим только лучи определенной длины волны. В объективе находится серый поглощающий светофильтр 2, слу-

жащий для расширения пределов измерения.

Объектив и окуляр прибора могут перемещаться вдоль оси в телескопической трубке, что позволяет получить резкое изображение раскаленного тела и нити. При подготовке оптической системы к измерению трубку наводят на тело и передвигают объектив до получения четкого изображения тела и нити лампы (в виде резкой черной подковки). Включив источник тока, реостатом регулируют яркость нити до тех пор, пока средняя часть ее не сольется с освещенным телом. В этот момент по шкале милливольтметра отсчитывают температуру тела.

Зависимость действительной температуры тела от яркостной, измеряемой пирометром, выражается зависимостью:

$$T_{\theta} = \left(\frac{1}{T_{\lambda}} - \frac{\lambda}{C} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} \right)^{-1},$$

где λ - длина волны монохроматического излучения; C – константа уравнения Вина; ε_{λ} - степень черноты тела для данной длины волны.

Стабильность показаний пирометра с исчезающей нитью зависит, главным образом, от постоянства характеристик измерительного прибора и лампы. Лампа с вольфрамовой нитью в течение очень длительного периода сохраняет присущую ей зависимость яркости нити от силы протекающего через нее тока, если температура не превышает 1400°C. Нагрев до температуры выше 1400°C приводит к распылению вольфрамовой нити и изменению ее сопротивления; возгоняющийся вольфрам оседает на стенках колбы лампы и образует темный налет. По этим причинам яркостная характеристика лампы изменяется. Предел измерения повышают введением серого светофильтра, который в одинаковой степени поглощает энергию волн всех длин. Стекло серого светофильтра выбирают такой оптической плотности, чтобы при яркостной температуре излучателя выше 1400°C нить лампы накаливания нагревалась до яркостных температур не выше 1400°C. В соответствии с этим милливольтметр снабжают двумя шкалами: верхней – для измерения температур от 800 до 1400°C с выведенным серым светофильтром и нижней – для температур выше 1300°C с введенным серым светофильтром.

Приборостроительная промышленность выпускает переносные пирометры с исчезающей нитью в различном конструктивном оформлении для температур от 800°C до нескольких тысяч градусов. Пирометры работают с эффективной длиной волны 0,65 или 0,66 мкм.

2.8.2. Пирометры спектрального отношения (цветовые)

В цветowych пирометрах, применяемых для промышленных измерений, определяется отношение спектральной энергетической яркости (СЭЯ) реального тела в лучах двух заранее выбранных длин волн, т. е. показания пирометра являются функцией $f(E_{\lambda_1}/E_{\lambda_2})$. Это отношение для каждой температуры различно, но вполне однозначно.

В большинстве случаев для реальных тел кривые $E_\lambda = f(\lambda)$ при различных температурах совершенно подобны кривым для абсолютно черного тела; поэтому практически не требуется вводить поправки на неполноту излучения, что является основным преимуществом цветowego пирометра. Вторым важным преимуществом цветowych пирометров по сравнению с радиационными и яркостными является независимость результата измерения от расстояния до объекта измерения и от поглощения радиации в среде. Большая часть конструкций цветowych пирометров основана на определении цвета измеряемого тела по отношению энергетических яркостей для двух длин волн, не очень близких одна к другой в видимой части спектра. Чтобы избежать зависимости результатов измерения от субъективных особенностей наблюдателя (цветочувствительность и утомляемость глаза), в цветowych пирометрах для измерения отношения энергетических яркостей используют фотоэлементы.

Измеряемое излучение через защитное стекло 1 (рис. 2.31) и объектив 2 попадает на фотоэлемент 4.

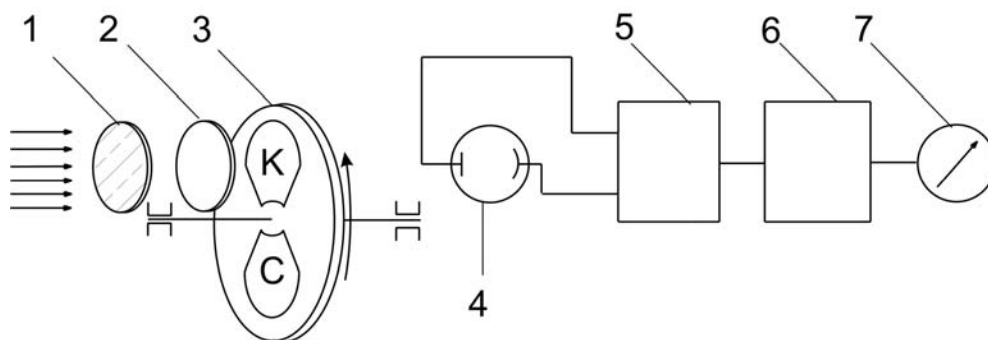


Рис.2.31. Принципиальная схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом:

- 1-защитное стекло; 2-объектив; 3-обтюратор; 4-фотоэлемент;
- 5-электронный усилитель; 6-логарифмирующее устройство;
- 7-милливольтметр

Между объективом и фотоэлементом установлен обтюратор 3, вра-

щаемый синхронным двигателем. Обтюратор выполнен в виде диска с двумя отверстиями, одно из которых закрыто красным светофильтром К, другое – синим С. Таким образом, при вращении обтюратора на фотоэлемент попеременно попадают излучения соответствующей СЭЯ. Спектральная характеристика фотоэлемента зависит от температуры, поэтому фотоэлемент в пирометре заключен в термостат с автоматическим регулированием.

Электрический ток, напряжение которого пропорционально соответствующим СЭЯ предварительно усиливается электронным усилителем 5 и преобразуется специальным электронным логарифмирующим устройством 6 в постоянный ток; сила постоянного тока зависит от $1/T$. Сила тока логарифмирующего устройства измеряется указывающим или регистрирующим милливольтметром 7.

Зависимость действительной температуры тела от цветовой, измеряемой пирометром, выражается зависимостью:

$$T_o = \left(\frac{1}{T_u} - \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda 1}/\varepsilon_{\lambda 2})}{C(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} \right)^{-1},$$

где $\varepsilon_{\lambda 1}, \varepsilon_{\lambda 2}$ - степень черноты физического тела для лучей с длиной волны соответственно λ_1, λ_2 ; C – константа уравнения Вина.

Предел измерения пирометров составляет от 300 до 2800°C, основная погрешность при измерении температуры физических тел не превышает ± 1 % от верхнего предела измерений.

Имеются цветковые пирометры с дифференциальной измерительной схемой, включающей два фотоэлемента.

2.8.3. Пирометры полного излучения (радиационные)

Пирометры полного излучения измеряют радиационную температуру тела, поэтому их часто называют радиационными (или радиометрами). Принцип действия данных измерителей температуры основан на использовании закона Стефана-Больцмана.

Пирометр снабжен оптической системой (линзой, зеркалом), собирающей испускаемые нагретым телом лучи на каком-либо теплоприемнике. Теплоприемник обычно состоит из миниатюрной термоэлектрической батареи (из нескольких малоинерционных последовательно соединенных ТЭП), термометра сопротивления или полупроводникового терморезистора. В качестве измерительных приборов применяют милливольтметры,

автоматические потенциометры и уравновешенные мосты.

Пирометр с термобатареей (рис. 2.32) состоит из телескопа с линзой 1 объектива и линзой 2 окуляра. На пути лучей линзы 1 установлена диафрагма 3, а в фокусе линзы объектива – термоэлектрическая батарея 4.

Рабочие спаи ТЭП прикреплены к крестообразной пластинке из платиновой фольги, покрытой платиновой чернью для лучшего поглощения падающих лучей. Свободные концы ТЭП термометров укреплены на слюдяной пластинке, а соединительные провода выведены к клеммам, находящимся в корпусе телескопа. Перед окулярной линзой помещено цветное стекло 5 для защиты глаз при установке пирометра. Температура рабочих концов термобатареи не должна превышать 250 °С. Для уменьшения числа лучей, падающих на термобатарею, служит диафрагма 3.

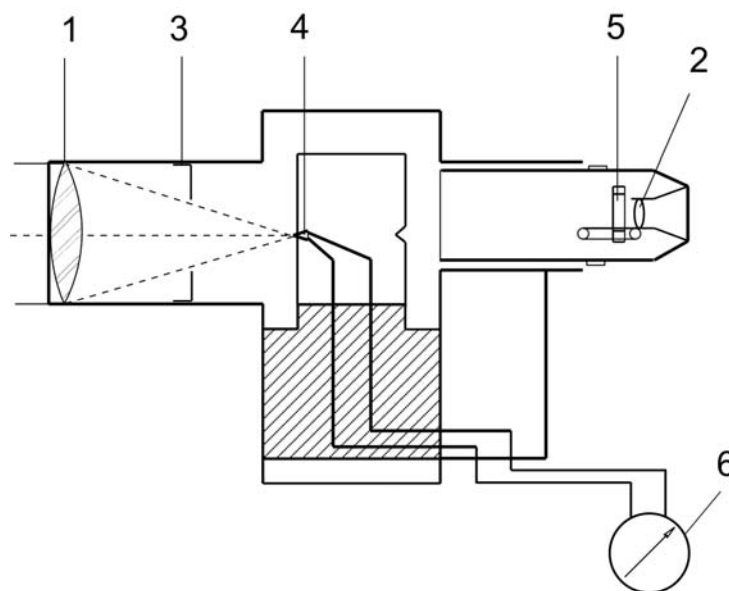


Рис.2.32. Принципиальная схема пирометра полного излучения с термобатареей в стеклянном баллончике:

1,2-линзы; 3-диафрагма; 4-батарея; 5-цветное стекло;
6 - милливольтметр.

Вид материала линзы определяет интервал измеряемых температур и градуировочную характеристику. Стекло из флюорита обеспечивает возможность измерения низких температур начиная с 100⁰С, кварцевое стекло используется для температуры 400 - 1500⁰С, а оптическое стекло для температур 950⁰С и выше.

Зависимость действительной температуры тела от радиационной, измеряемой пирометром, выражается зависимостью:

$$T_o = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}},$$

где ε - степень черноты физического тела для всех длин волн.

Данными пирометрами измеряют температуру от 100 до 3500⁰С. Основная допустимая погрешность технических промышленных пирометров возрастает с увеличением верхнего предела измерения и для температур 1000, 2000 и 3000⁰С составляет соответственно ± 12 ; ± 20 и ± 35 ⁰С.

Точный учет количества поступающей в приемник лучистой энергии крайне сложен, так как между теплоприемником и окружающей средой происходит теплообмен, поэтому прибор может иметь не поддающиеся учету погрешности. Несмотря на эти недостатки, пирометры полного излучения широко применяют в производственной практике; они могут быть установлены стационарно, позволяют применять дистанционную передачу, автоматически записывать и регулировать температуру.

2.8.4. Тепловизоры

Тепловидение – это направление в технических измерениях, изучающее физические основы, методы и приборы, обеспечивающие возможность наблюдения слабонагретых объектов. Приборы, работающие в этом направлении называются тепловизорами (термографами). Тепловизоры относятся к оптико-электронным приборам пассивного типа, работающие в инфракрасном диапазоне спектра излучения.

Диапазон инфракрасного излучения делится на несколько поддиапазонов (табл.2.5).

Таблица 2.5

Длина волн (мкм)	Название поддиапазона
0.76-1.5	Ближнее инфракрасное излучение
1.5-5.5	Коротковолновое инфракрасное излучение
5.6-25	Длинноволновое инфракрасное излучение
25-100	Дальнее инфракрасное излучение

Принцип их действия основан на преобразовании инфракрасного излучения в электрический сигнал, который подвергается усилению и автоматической обработке, а затем преобразуется в видимое изображение теплового поля объекта (термограмму) для его визуальной и количественной оценки.

Общий принцип устройства тепловизора представлен на рис.2.33.

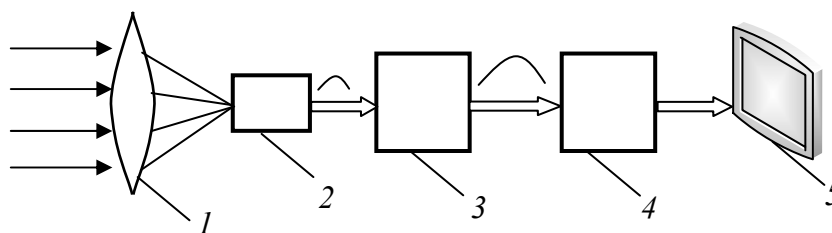


Рис. 2.33. Структурная схема тепловизора:
1 – линза; 2 – фотоприемник; 3 – электронный усилитель; 4 – микро-
процессор; 5 – блок отображения информации

Инфракрасное излучение концентрируется системой специальных линз 1 и попадает на фотоприемник 2, который избирательно чувствителен к определенной длине волны инфракрасного спектра. Попадаемое на него излучение приводит к изменению электрических свойств фотоприемника, регистрируется и усиливается электронным усилителем 3. Полученный сигнал подвергается цифровой обработке в микропроцессорном блоке 4 и это значение передается на блок отображения информации 5, представляющий собой экран жидкокристаллического дисплея. Блок отображения информации имеет цветовую палитру, в которой каждому значению сигнала присваивается определенный цвет. После этого на экране монитора появляется точка, цвет которой соответствует численному значению инфракрасного излучения, которое попало на фотоприемник. Сканирующая система (зеркала или полупроводниковая матрица) проводит последовательный обход всех точек в пределах поля видимости прибора, в результате получается видимая картина инфракрасного излучения объекта. Чувствительность детектора к тепловому излучению тем выше, чем ниже его собственная температура, поэтому его помещают в специальное термостатирующее холодильное устройство. Один из способов охлаждения осуществляется посредством элементов Пельтье (полупроводники, дающие перепад температур (тепловой насос) при пропускании через них тока).

Таким образом, на экране тепловизора видны значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения тепловизора, отображенные согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).

Высокая чувствительность тепловизоров реализуется благодаря наличию высокочувствительных полупроводниковых приемников излучения из антимонида индия InSb, ртуть-кадмий-теллура Hg-Cd-Te и др.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «температура».
2. Перечислите основные виды температурных шкал.
3. Что такое реперная точка?
4. Приведите классификацию средств измерения температуры.
5. В чем состоит принцип действия жидкостных термометров?
6. Чем отличаются биметаллические термометры от dilatометрических?
7. Укажите основные конструктивные части манометрических термометров?
8. Укажите типы манометрических термометров.
9. У какого типа манометрических термометров самая большая инерционность и почему?
10. Укажите зависимость, по которой изменяется давление в газовом манометрическом термометре от температуры.
11. Дайте определение понятию «термоэлектрический эффект».
12. Поясните принцип действия термопары.
13. Укажите основное уравнение термопары.
14. Что такое холодный и горячий спай термопары?
15. Докажите, что включение третьего проводника в цепь термопары не влияет на результат измерений.
16. Как подбираются компенсационные термоэлектродные провода для термопары?
17. Укажите способы для введения поправки на температуру свободных концов термопары.
18. Назовите основные термоэлектродные материалы и типы термопар.
19. У какого из типов термопар градуировочная характеристика близка к линейной?
20. Поясните конструкцию стандартной термопары.
21. Что такое термопарный кабель?
22. Укажите основные источники погрешности при измерении температуры с помощью термопар.
23. Поясните конструкцию милливольтметра?
24. От каких величин зависит угол поворота рамки милливольтметра?
25. Укажите основные типы потенциометров.

26. Поясните принцип действия потенциометра постоянного тока.
27. Что такое реохорд?
28. Для чего применяют нормирующие преобразователи?
29. Поясните принцип действия термометра сопротивления.
30. Назовите основные материалы для изготовления термометров сопротивления.
31. Поясните конструкцию термометра сопротивления.
32. Какой из термометров сопротивления имеет наибольший диапазон измерения?
33. Какие вторичные приборы могут работать в комплекте с термометром сопротивления?
34. Поясните принцип действия логометра.
35. Почему показания логометра не зависят от колебаний напряжения источника питания?
36. Поясните принцип действия уравновешенного моста.
37. В чем состоит преимущество трехпроводной схемы подключения термометра сопротивления относительно двухпроводной.
38. Перечислите бесконтактные методы измерения температуры.
39. Назовите преимущества бесконтактных методов измерения температуры.
40. Какие виды излучений испускает нагретое тело?
41. Какой из типов пирометров измеряет яркостную температуру тела?
42. Поясните принцип действия квазимонохроматического пирометра.
43. Укажите основные преимущества цветковых пирометров.
44. Поясните принцип действия пирометра спектрального отношения.
45. Что такое радиационная температура?
46. Поясните принцип действия пирометра полного излучения.
47. Что такое тепловизоры?
48. Поясните принцип действия тепловизора.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

3.1. Основные понятия

Давление является одним из важнейших физических параметров, и его измерение необходимо как в расчетных целях, например для определения расхода, количества и тепловой энергии среды, так и в технологических целях, например для контроля и прогнозирования безопасных и эффективных гидравлических режимов напорных трубопроводов, используемых на предприятии.

Давлением P называют отношение абсолютной величины нормального, то есть действующего перпендикулярно к поверхности тела, вектора силы F к площади S этой поверхности. При равномерном распределении сил давление равно частному от деления нормальной составляющей силы давления на площадь, на которую эта сила действует.

3.2. Виды измеряемых давлений

На практике давления газообразных и жидких сред могут измеряться относительно двух различных уровней (рис. 3.1):

- уровня абсолютного вакуума, или абсолютного нуля давления - идеализированного состояния среды в замкнутом пространстве, из которого удалены все молекулы и атомы вещества среды;
- уровня атмосферного, или барометрического давления (ГОСТ 8.271-77).

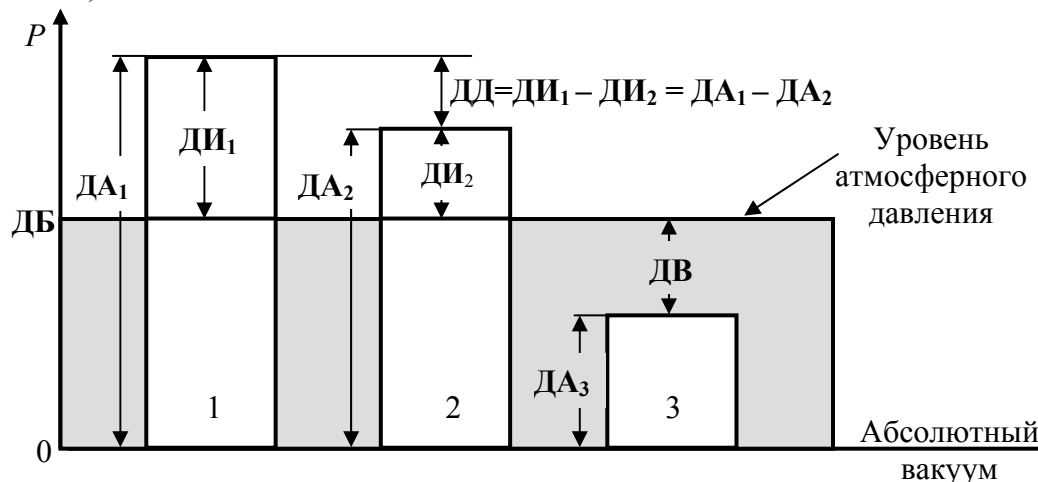


Рис. 3.1. Виды измеряемых давлений в точках 1, 2, 3 физического процесса:

ДБ – давление барометрическое; ДА – давление абсолютное;
ДИ – давление избыточное; ДВ – давление вакуумметрическое; ДД – давление дифференциальное

Давление, измеряемое относительно вакуума, называют давлением абсолютным (ДА). Барометрическое давление (ДБ) - это абсолютное давление земной атмосферы. Оно зависит от конкретных условий измерения: температуры воздуха и высоты над уровнем моря. Давление, которое больше или меньше атмосферного, но измеряется относительно атмосферного, называют соответственно избыточным (ДИ) или давлением разрежения, вакуумметрическим (ДВ). Очевидно, что $ДА = ДБ + ДИ$ или $ДА = ДБ - ДВ$. При измерении разности давлений сред в двух различных процессах или двух точках одного процесса, причем таких, что ни одно из давлений не является атмосферным, такую разность называют дифференциальным давлением (ДД).

3.3. Системные и внесистемные единицы измерения давления

Единицы измерения давления (СТ СЭВ 1052-89) определяются одним из двух способов:

1) через высоту столба жидкости, уравнивающего измеряемое давление в конкретном физическом процессе: в единицах водяного столба при 4°C (мм вод. ст. или м вод. ст.) или ртутного столба при 0°C (мм рт. ст., или Торр) и нормальном ускорении свободного падения;

2) через единицы силы и площади.

В Международной системе единиц (СИ), принятой в 1960 году, единицей силы является Н (ньютон), а единицей площади - $м^2$. Отсюда определяется единица давления паскаль $Па = 1 Н/м^2$ и ее производные, например, килопаскаль ($1 кПа = 10^3 Па$), мегапаскаль ($1 МПа = 10^3 кПа = 10^6 Па$). Наряду с системой СИ в области измерения давления продолжают использоваться единицы и других, более ранних систем, а также внесистемные единицы.

В технической системе единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда) сила измеряется в килограммах силы ($1 кгс \approx 9,8 Н$). Единицы давления в МКГСС - $кгс/м^2$ и $кгс/см^2$; единица $кгс/см^2$ получила название технической, или метрической атмосферы (ат). В случае измерения в единицах технической атмосферы избыточного давления используется обозначение «ати».

В физической системе единиц СГС (сантиметр, грамм, секунда) единицей силы является дина ($1 дин = 10^{-5} Н$). В рамках СГС введена единица давления бар ($1 бар = 1 дин/см^2$). Существует одноименная внесистемная, метеорологическая единица бар, или стандартная атмосфера ($1 бар = 10^6$

дин/см²; 1 мбар = 10⁻³ бар = 10³ дин/см²), что иногда, вне контекста, вызывает путаницу. Кроме указанных единиц на практике используется такая внесистемная единица, как физическая, или нормальная атмосфера (атм), которая эквивалентна уравновешивающему столбу 760 мм рт. ст.

В англоязычных странах широко распространена единица давления пси (psi=lbf/in²) - фунт силы на квадратный дюйм (1 фунт= 0,4536 кг).

В табл.3.1 указаны коэффициенты перевода одних системных или внесистемных единиц давления в другие: например, одной технической атмосфере соответствует давление 0,980665 в барах (здесь бар является внесистемной единицей). В действительности не всегда требуется столь высокая точность перевода единиц, которая отражена в таблице. Для приблизительных оценок и расчетов давления с относительной погрешностью не более 0,5% полезно использовать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ат} &= 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 0,97 \text{ атм} = 0,98 \cdot 10^3 \text{ мбар} = 0,98 \text{ бар} = \\ &= 10^4 \text{ мм вод.ст.} = 10 \text{ м вод.ст.} = 735 \text{ мм рт.ст.} = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па} = 98 \text{ кПа} = \\ &0,098 \text{ МПа} \end{aligned}$$

С ошибкой в 2% можно пренебречь разницей между технической атмосферой, стандартной атмосферой (баром) и десятой частью мегапаскаля (1 ат = 1 бар = 0,1 МПа), а с ошибкой в 3% - разницей между технической и физической атмосферами (1 ат = 1 атм).

Диапазон давлений, измеряемых в технике, достигает 17 порядков: от 10⁻⁸ Па в электровакуумном оборудовании до 10³ МПа при обработке металлов давлением. Материальным хранителем единиц давления являются первичные (национальные) и вторичные (рабочие) эталоны давления. Для поддиапазона 1-100 кПа избыточных, абсолютных и разностных давлений в качестве первичного эталона используется, как правило, ртутный двухтрубный (U-образный) манометр с лазерным считыванием высоты мениска (погрешность считывания не более 10⁻³ мм, а абсолютная суммарная погрешность прибора, учитывающая в том числе и влияние температуры, не превышает 0,0005% от верхней границы диапазона). Для поддиапазона 100 кПа - 100 МПа применяются газовые грузопоршневые манометры (точность 0,0035 - 0,004% от показаний). Газовые и жидкостные грузопоршневые манометры используются и как рабочие эталоны для передачи единиц давления промышленным образцовым приборам (их точность 0,01-0,1%).

Таблица 3.1

Таблица соответствия единиц давления

Системы единицы	Единицы давления	Па	кгс/см ² (ат)	бар	атм	мм рт. ст.	мм вод. ст.	пси (psi)
СИ	1 Па = 1 н/м ²	1	1,01972·10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0,98692·10 ⁻⁵	750,06·10 ⁻⁵	0,101972	1,45·10 ⁻⁴
МКС*	1 ат = 1 кгс/см ² (техническая атмосфера)	0,980665·10 ⁵	1	0,980665	0,96784	735,563	10 ⁴	14,223
Внесистемные	1 бар = 106 дин/см ²	10 ⁵	1,01972	1	0,98692	750,06	1,01972·10 ⁴	14,5
	1 атм = 760 мм рт.ст. (физическая атмосфера)	1,01325·10 ⁵	1,0332	1,01325	1	760	1,0332·10 ⁴	14,696
	1 мм рт. ст.	133,322	1,35951·10 ⁻³	1,33322·10 ⁻³	1,31579·10 ⁻³	1	13,5951	0,019337
	1 мм вод. ст. = 1 кгс/м ²	9,80665	10 ⁻⁴	9,80665·10 ⁻⁵	9,67841·10 ⁻⁵	7,3556·10 ⁻²	1	1,422·10 ⁻³
	1 psi = 1 lbf/in ²	6,894·10 ³	≈0,07	6,894·10 ⁻²	0,068	51,715	703,08	1

* - техническая система единиц (метр, килограмм-сила, секунда)

3.4. Классификация средств измерения давления

Для прямого измерения давления жидкой или газообразной среды с отображением его значения непосредственно на шкале, табло или индикаторе первичного измерительного прибора применяются **манометры** (ГОСТ 8.271-77). Если отображение значения давления на самом первичном приборе не производится, но он позволяет получать и дистанционно передавать соответствующий измеряемому параметру сигнал, то такой прибор **называют измерительным преобразователем давления (ИПД) или датчиком давления**. Возможно объединение этих двух свойств в одном приборе (манометр-датчик).

Манометры классифицируют по принципу действия и конструкции, по виду измеряемого давления, по применению и назначению, по типу отображения данных и другим признакам (рис. 3.2).

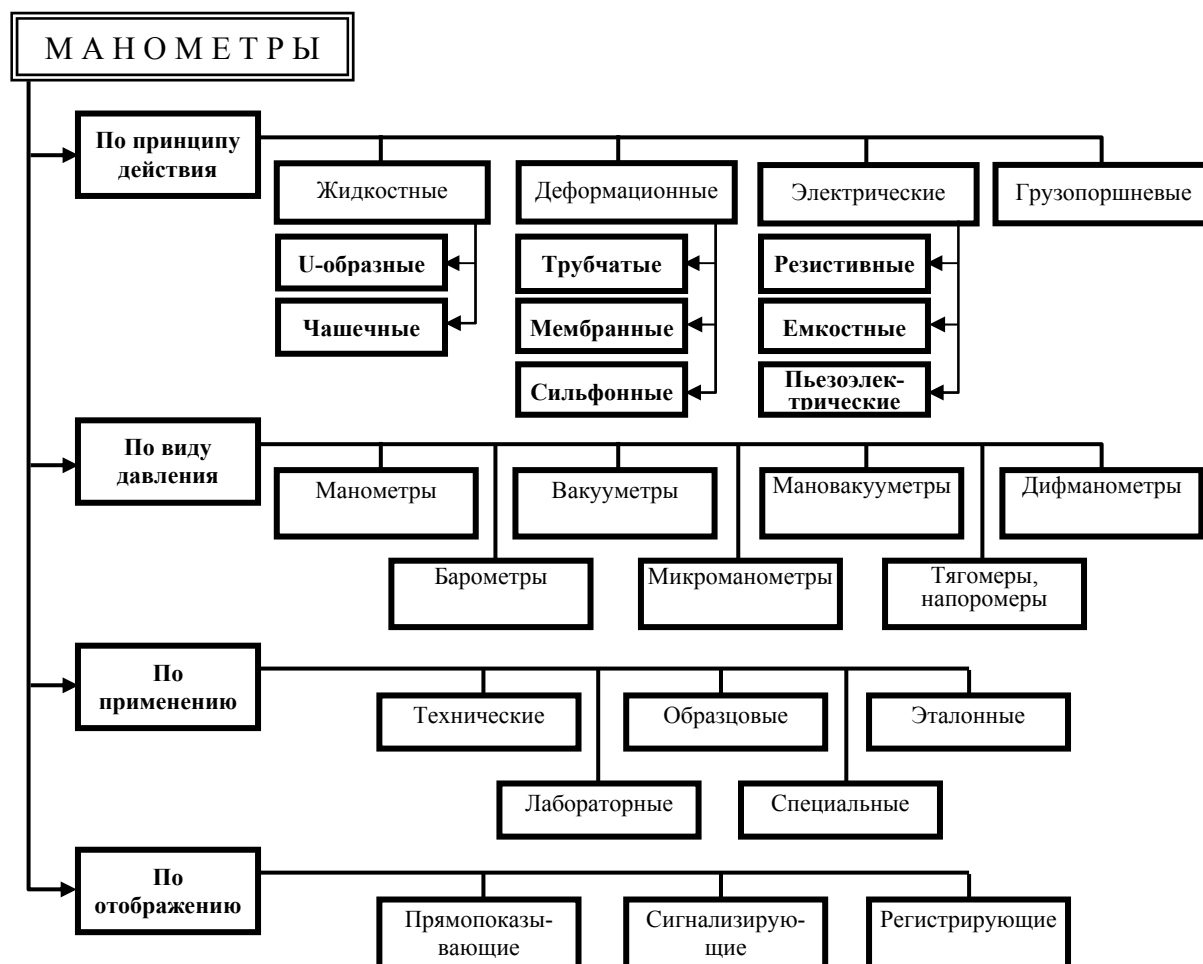


Рис. 3.2. Классификация манометров

По **принципу действия** манометры можно подразделить на:

- жидкостные (измеряемое давление уравнивается гидростатически столбом жидкости (воды, ртути) соответствующей высоты);
- деформационные (давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента (УЧЭ) - мембраны, трубчатой пружины, сильфона);
- электрические (давление определяется на основании зависимости электрических параметров: сопротивления, емкости, заряда, частоты - чувствительного элемента (ЧЭ) от измеряемого давления).
- грузопоршневые (измеряемое или воспроизводимое давление гидростатически уравнивается через жидкую или газообразную среду прибора давлением веса поршня с грузоприемным устройством и комплектом образцовых гирь);

По **виду измеряемого давления** манометры подразделяют на:

- собственно манометры (приборы для измерения избыточного и абсолютного давления);
- вакуумметры (приборы для измерения разрежения);
- мановакуумметры (приборы для измерения давления и разрежения);
- барометры (приборы для измерения атмосферного давления);
- дифференциальные манометры (дифманометры) (приборы для измерения разностного давления);
- напоромеры (приборы для измерения небольших (до 20-40 кПа) избыточных давлений газовых сред);
- тягомеры (приборы для измерения небольших (до 20-40 кПа) разрежений газовых сред);
- тягонапоромеры (приборы для измерения небольших (до 20-40 кПа) избыточных давлений и разрежений газовых сред);
- микроманометры (дифманометры с малым перепадом давления).

Технические характеристики всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими техническими условиями (ГОСТ 2405-88, ГОСТ 18140-81 и др).

По **области применения** манометры подразделяют на:

- общепромышленные или технические (работающие в промышленных условиях при перепадах температур и влажности окружающей среды, вибрациях, загрязнении внешней среды и т.п.);

- лабораторные (приборы повышенной точности для использования в комфортных и стабильных условиях лабораторий);
- образцовые (для поверки рабочих манометров);
- эталонные (хранители единиц давления с целью передачи их образцовым приборам);
- специальные (применяются в экстремальных условиях: на железнодорожном транспорте, судах, котельных установках, при работе с кислотными и другими агрессивными средами).

По **типу отображения значений** измеряемого давления манометры подразделяют на:

- прямопоказывающие (с визуальным считыванием данных непосредственно по аналоговой (стрелочной) или цифровой шкале прибора);
- сигнализирующие (электроконтактные) (с выдачей управляющего электрического сигнала путем замыкания или размыкания контактов при достижении измеряемым давлением заранее установленного контрольного значения);
- регистрирующие (самопишущие) (с записью в память значений давления как функции времени и их отображением на электронном табло).

Манометры выполняют функцию локального контроля и в большинстве случаев из-за отсутствия возможности дистанционного доступа к их показаниям (за исключением манометров с унифицированным выходным электрическим сигналом) не могут использоваться для целей современной автоматизации. Такую возможность обеспечивают измерительные преобразователи давления.

Классифицируются эти приборы по принципу действия, виду измеряемого давления и типу выходного сигнала (рис. 3.3). ИПД различаются, кроме того, по используемым единицам измерения и ряду основных технических параметров (ГОСТ 22520-85).

По **принципу действия** или **способу преобразования измеряемого давления в выходной сигнал** ИПД подразделяются, прежде всего, на:

- деформационные (деформационные перемещения упругого чувствительного элемента (мембраны, сильфона, трубки Бурдона) трансформируются с помощью дополнительных промежуточных механизмов и преобразователей в электрический или электромагнитный сигнал);
- электрические (измеряемое давление, оказывая воздействия на чувствительный элемент, изменяет его собственные электрические параметры:

сопротивление, ёмкость или заряд, которые становятся мерой этого давления).

В последние годы получили развитие и другие принципы создания ИПД: волоконно-оптические, гальваномагнитные, объемного сжатия, акустические, диффузионные и т.д.

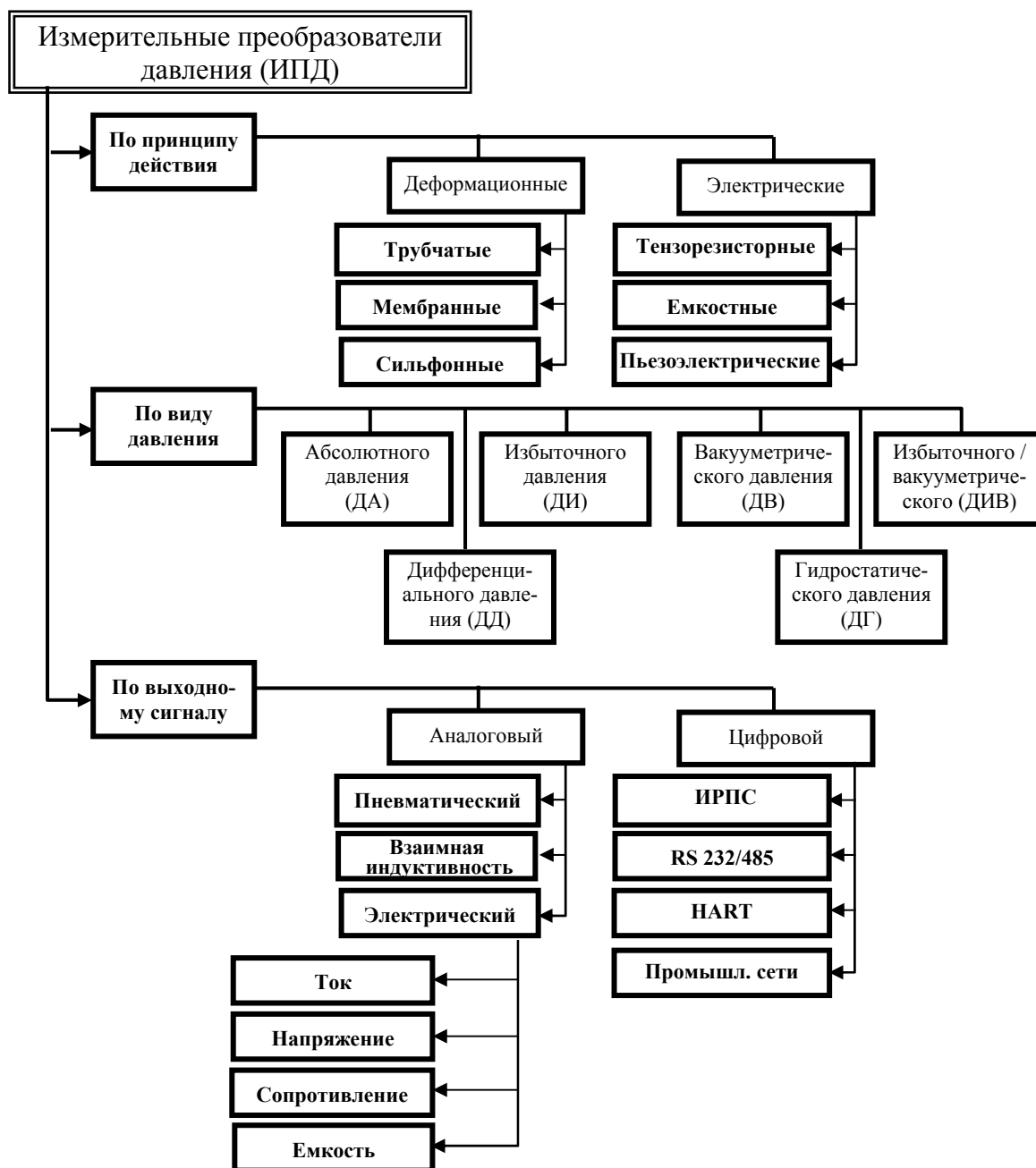


Рис.3.3. Классификация измерительных преобразователей давления

По *виду измеряемого давления* ИПД подразделяются на:

- преобразователи абсолютного давления (ДА);
- преобразователи избыточного давления (ДИ);
- преобразователи вакууметрического давления (ДВ);
- преобразователи избыточного/вакууметрического давления (ДИВ);
- преобразователи дифференциального давления (ДД);
- преобразователи гидростатического давления (ДГ).

По *выходному сигналу* ИПД подразделяются на:

- аналоговые (измеряемое давление преобразуется в аналоговый унифицированный пневматический или электрический сигнал);
- цифровые.

Основной парк действующих ИПД относится к аналоговым с унифицированным токовым сигналом 0...5, 0...20 или 4...20 мА. В последнее десятилетие наметился переход к ИПД с цифровым выходом. Широкое распространение получил цифровой протокол HART. Этот открытый стандартный гибридный протокол двунаправленной связи предусматривает передачу цифровой информации поверх стандартного аналогового сигнала 4...20 мА. Бурно развивается системная интеграция первичных преобразователей с использованием различных разновидностей промышленных сетей (Foundation Fieldbus, ModBus, Profibus и др.). При этом используется полностью цифровой коммуникационный протокол для передачи информации в обоих направлениях между ИПД и системами управления, существенно облегчая взаимозаменяемость приборов разных мировых производителей. В отечественных цифровых ИПД пока преобладают такие цифровые интерфейсы, как ИРПС (интерфейс радиальной последовательной связи) и RS-232C.

3.5. Жидкостные манометры

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

Переносной **U-образный манометр**, представляющий собой согнутую в виде буквы U стеклянную трубку 1 показан на рис.3.4.

Трубка закреплена на доске 2 со шкалой 3, расположенной между коленами трубки, и заполнена жидкостью (спиртом, водой, ртутью). Один

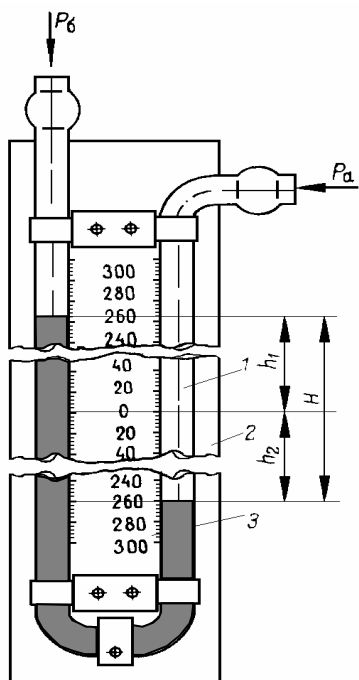


Рис.3.4. U-образный манометр:
1 – трубка; 2 – доска; 3 – шкала

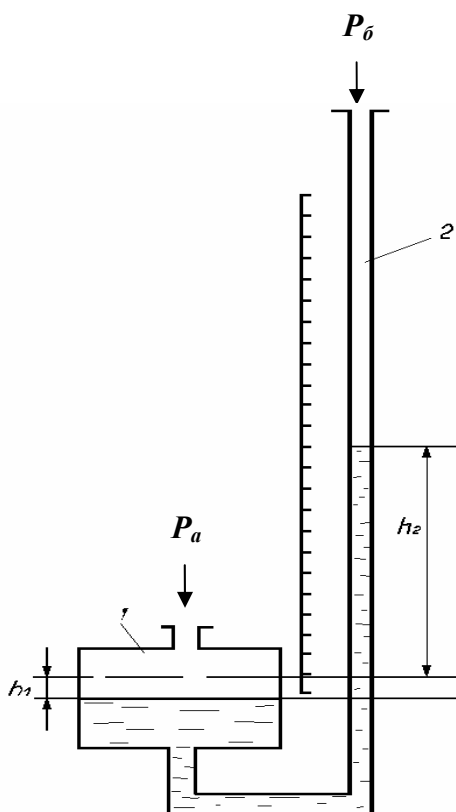


Рис.3.5. Чашечный манометр:
1 – чашка; 2 – трубка

конец трубки соединен с полостью, в которой измеряется давление, другой конец трубки сообщается с атмосферой. Под действием измеряемого давления жидкость в трубке перемещается из одного колена в другое до тех пор, пока измеряемое давление не уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости в открытом колене.

Система находится в равновесии, если гидростатическое давление столба жидкости в открытом колене уравнивается давлением в другом колене:

$$P_a S = P_0 S + H S g (\rho - \rho_1), \quad (3.1)$$

где P_a - абсолютное давление в аппарате или трубопроводе, Па; P_0 - атмосферное давление, Па; S - площадь сечения трубки, м^2 ; H - разность уровней жидкости в обоих коленах или высота уравнивающего столба жидкости, м; ρ - плотность жидкости в манометре, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_1 - плотность среды, находящейся над жидкостью в манометре, $\text{кг}/\text{м}^3$; g - ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Из уравнения (3.1):

$$P_u = P_a - P_0 = H g (\rho - \rho_1). \quad (3.2)$$

Если над жидкостью в приборе находится газ, то

$$P_u = P_a - P_0 = H g \rho. \quad (3.3)$$

Если давление в пространстве, с которым соединен прибор, ниже атмосферного, то жидкость в трубках переместится в обратном направлении, и высота ее столба будет соответствовать раз-

режению (вакууму). Присоединив оба свободных конца трубки прибора к двум полостям с разными давлениями, можно по разности уровней жидкости в приборе определить разность давлений.

Прибор наполнен жидкостью до нулевой отметки шкалы. Для определения высоты столба жидкости необходимо делать два отсчета (снижения в одном колене, подъема в другом) и суммировать замеренные величины, т.е. $H = h_1 + h_2$.

Чашечный манометр, являющийся разновидностью U-образного, показан на рис.3.5. Одно из колен чашечного манометра выполнено в виде сосуда (чашки) 1, диаметр которого больше диаметра трубки 2, представляющей собой другое колено. Полость с измеряемым давлением (больше атмосферного) соединяется с чашкой, а трубка соединяется с атмосферой. Так как площадь сечения чашки больше площади сечения трубки, жидкость под действием давления в чашке опускается на высоту h_1 , которая меньше высоты подъема в трубке h_2 . Обычно площадь сечения чашки значительно больше сечения трубки, поэтому величиной понижения уровня жидкости в чашке пренебрегают, и результат отсчитывают только по высоте столба жидкости в трубке от начального значения. Однако, при этом возникает погрешность, вызванная понижением уровня жидкости в чашке, что изменяет положение нуля шкалы. Например, при диаметре чашки D в десять раз большем диаметра трубки d , получим:

$$h_1 = 0,01h_2,$$

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

Давление определяется как:

$$P_u = P_a - P_o = h_2 g \left(1 + \frac{s}{S}\right) (\rho - \rho_1). \quad (3.4)$$

3.6. Деформационные датчики давления

В промышленной практике измерения давления и разности давлений широкое применение получили деформационные (с упругим чувствительным элементом) приборы. В этих приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими си-

ле, которые преобразуются передаточными механизмами в угловое или линейное перемещение указателя по шкале прибора.

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

- приборы с трубчатой пружиной;
- мембранные приборы;
- сильфонные приборы.

Манометры с трубчатой пружиной - один из наиболее распространенных видов деформационных приборов. Чувствительным элементом таких приборов является согнутая по дуге окружности и запаянная с одного конца трубка 1 (трубка Бурдона) эллиптического, плоскоовального сечения или круглого сечения (рис. 3.6). Третий вид трубок выполняют из легированной стали и используют для измерения высоких давлений (свыше 98 МПа).

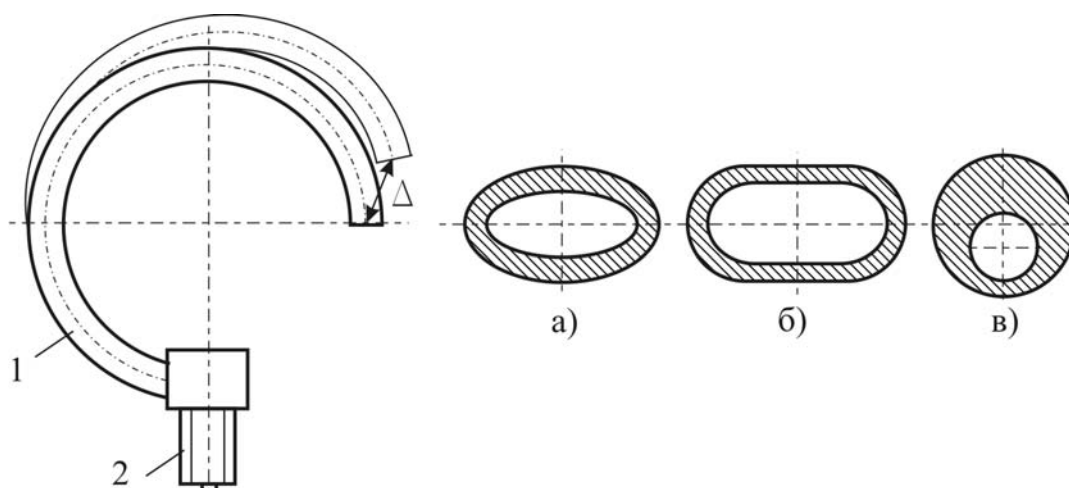


Рис. 3.6. Трубчатая пружина Бурдона:

а – эллиптического сечения; б – плоскоовального сечения; в – круглого сечения
1 – трубка; 2 – держатель

Одним концом трубка заделана в держатель 2, оканчивающийся ниппелем с резьбой для присоединения к полости, в которой измеряется давление. Внутри держателя есть канал, соединяющийся с внутренней полостью трубки. Если в трубку подать жидкость, газ или пар под избыточным давлением, то кривизна трубки уменьшается и она распрямляется; при создании разрежения внутри трубки кривизна ее возрастает, и трубка скручивается. Свойство изогнутой трубки некруглого сечения изменять величину изгиба при изменении давления обусловлено изменением формы сечения. Под действием давления внутри трубки эллиптическое или овальное сечение, деформируясь, приближается к круго-

вому, что приводит к раскручиванию трубки, т.е. угловому перемещению ее свободного конца на небольшую величину Δ .

В трубках круглого сечения, благодаря эксцентричному каналу, избыточное давление, действуя на заглушку свободного конца трубки, создает момент, вызывающий уменьшение ее кривизны. Это перемещение в определенных пределах пропорционально измеряемому давлению.

Перемещение свободного конца до определенного предела пропорционально давлению $\Delta = k \cdot P$. При дальнейшем повышении давления линейная зависимость нарушается – деформация начинает расти быстрее увеличения давления. Предельное давление, при котором еще сохраняется линейная зависимость между перемещением конца трубки и давлением, называется пределом пропорциональности трубки $P_{\text{п}}$. Предел пропорциональности является важнейшей характеристикой трубки. При переходе давления за предел пропорциональности трубка приобретает остаточную деформацию и становится непригодной для измерения. Чтобы не допустить возникновения остаточной деформации, наибольшее рабочее давление P_{max} (разрежение или разность давлений) назначают ниже предела пропорциональности $P_{\text{п}}$. Отношение $P_{\text{п}}/P_{\text{max}} = k$ называется коэффициентом запаса. Во всех случаях коэффициент k должен быть больше единицы. Для максимального увеличения долговечности трубки и снижения влияния упругого последействия принимают $k = 1,35 \div 2,5$.

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

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

Перемещение Δ свободного конца трубки под действием давления весьма невелико, поэтому в конструкцию прибора введен передаточный механизм, увеличивающий масштаб перемещения конца трубки. Конструкция манометра с трибно-секторным передаточным механизмом показана на рис. 3.7.

Манометры с трубчатой пружиной изготавливают на давление до 1000 МПа.

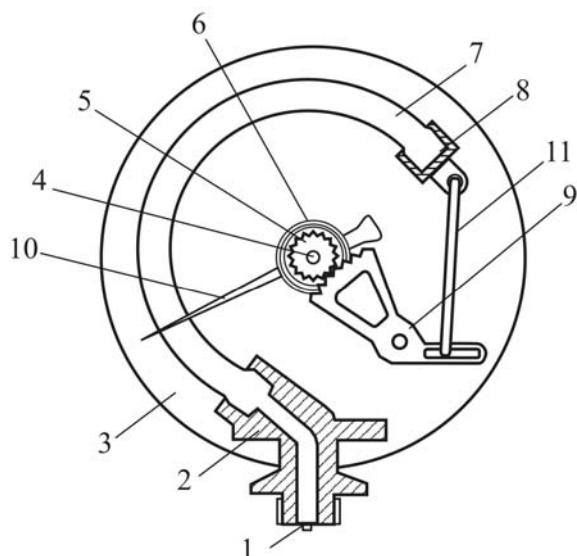


Рис. 3.7. Манометр с трубчатой пружиной:

1 – ниппель; 2 – держатель; 3 – корпус; 4 – ось; 5 – шестерня; 6 – пружина; 7 – трубчатая пружина; 8 – запаянный конец; 9 – зубчатый сектор; 10 – стрелка; 11 – тяга.

Мембранные приборы. Приборы с чувствительным элементом в виде плоских и гофрированных мембран, мембранных коробок и мембранных блоков применяют для измерения небольших избыточных давлений и разрежений (манометры, напоромеры и тягомеры), а также перепадов давления (дифманометры).

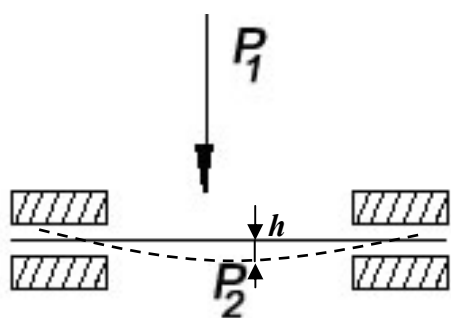


Рис. 3.8. Мембрана и ее прогиб

Мембрана представляет собой тонкий диск определенного диаметра, выполненный из металла или специального упругого материала, который жестко закрепляется по периметру в измерительном блоке (рис. 3.8). Под воздействием измеряемого давления P_1 (при условии $P_1 > P_2$, где P_2 – внешнее давление) происходит прогиб мембраны на величину h , что в дальнейшем приводит к преобразованию этого перемещения во вращательное движение стрелки прибора.

Мембраны делят на упругие и «вялые». Упругие мембраны выполняют из тонких металлических пластин (сталь, бронза, латунь). Они обладают достаточно большой собственной жесткостью, их статические характеристики, представляющие зависимость перемещения h центра мембраны или развиваемой силы от давлений P_1 и P_2 или перепада $\Delta P = P_1 - P_2$, обычно нелинейны. Применяют плоские и гофрированные упругие мембраны (рис. 3.9, а, б). Наличие гофров делает статическую характеристику мембраны более линейной.

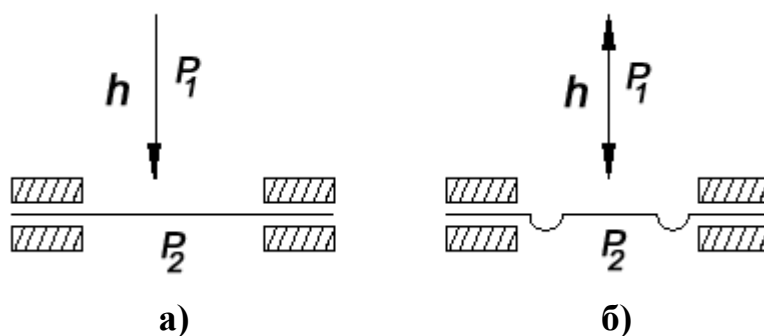


Рис. 3.9. Упругие мембраны:
а – плоская; б – гофрированная

Упругие мембраны используют, преимущественно, как чувствительные элементы в первичных преобразователях, например, в дифманометрах.

«Вялые» мембраны выполняют из прорезиненной тонкой ткани (капрон, шелк, полотно). К ним предъявляют два требования - отсутствие собственной жесткости и большая прочность. Эти требования вытекают из основного назначения «вялых» мембран – преобразовывать большие перепады давлений в силу при крайне малых перемещениях (порядка сотых долей мм). «Вялые» мембраны обычно снабжены металлическим жестким центром. Они также могут быть плоскими и гофрированными.

Величина прогиба мембраны является сложной функцией действующего на нее давления, ее геометрических параметров (диаметра, толщины, числа и формы гофров), а также модуля упругости материала мембраны. Число, форма и размеры гофра зависят от назначения прибора, пределов измерения и других факторов. Гофрировка мембраны увеличивает ее жесткость, т.е. уменьшает прогиб при одинаковом давлении. Из-за сложности расчета в большинстве случаев характеристику мембраны подбирают опытным путем.

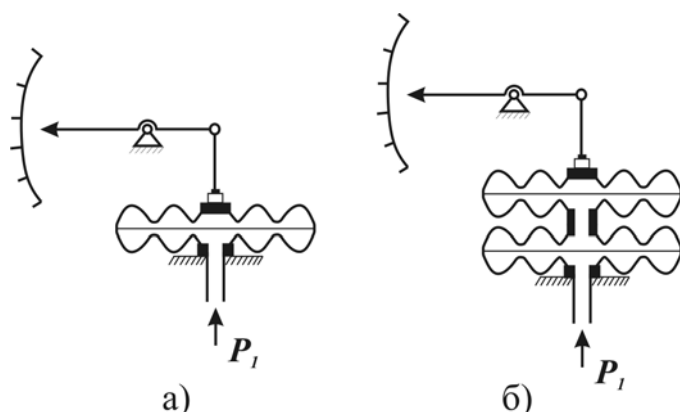


Рис. 3.10. Мембранные чувствительные элементы:

а – мембранная коробка; б – мембранный блок

ют опытным путем.

Для увеличения прогиба в приборах для малых давлений (разрежений) мембраны попарно соединяют (сваркой или пайкой) в мембранные коробки (рис. 3.10,а), а коробки – в мембранные блоки (рис. 3.10,б).

Сильфонные приборы. Сильфон – это тонкостенная металлическая камера с гофрированной боковой поверхностью (рис. 3.11). Изготавливают сильфоны из латуни, а также из нержавеющей стали или бериллиевой бронзы. Они применяются в качестве чувствительных элементов приборов давления, которые своевременно и точно реагируют на изменение давления.

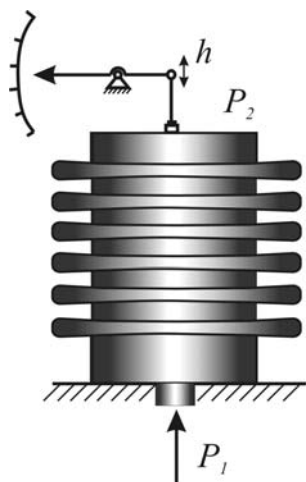


Рис. 3.11. Сильфон

При действии нагрузки (внешнего P_2 или внутреннего P_1 давления) длина сильфона изменяется, увеличиваясь или уменьшаясь в зависимости от направления приложенной силы. Наличие гофров позволяет перемещать подвижную часть сильфона на значительное расстояние (десятки миллиметров) без заметного изменения его характеристик. Выходная координата сильфона - перемещение h , входные - давления P_1 и P_2 или их разность ΔP .

Существенными недостатками сильфонов являются значительный гистерезис и некоторая нелинейность характеристики. Для увеличения жесткости, уменьшения влияния гистерезиса и нелинейности часто внутрь сильфона помещают винтовую цилиндрическую пружину. В этом случае характеристика сильфона изменяется, так как к жесткости сильфона добавляется жесткость пружины. Жесткость пружины обычно в несколько раз превышает жесткость сильфона, благодаря чему резко уменьшается влияние гистерезиса сильфона и некоторой нелинейности его характеристики. Расчетные формулы основных размеров сильфонов весьма сложны и не всегда подтверждаются опытом. Обычно диаметр сильфонов находится в пределах 20 - 80 мм.

3.7. Электрические датчики давления

В данных приборах измеряемое давление, оказывая воздействия на чувствительный элемент, изменяет его собственные электрические параметры: сопротивление, ёмкость или заряд, которые становятся мерой этого давления. Подавляющее большинство современных общепромышленных ИПД реализовано на основе трех основных принципов:

1) **емкостные** – используют упругий чувствительный элемент в виде конденсатора с переменным зазором: смещение или прогиб под действием прилагаемого давления подвижного электрода-мембраны относительно неподвижного изменяет его ёмкость;

2) **пьезоэлектрические** – основаны на зависимости поляризованного заряда или резонансной частоты пьезокристаллов: кварца, турмалина и других от прилагаемого к ним давления;

3) **тензорезисторные** – используют зависимость активного сопротивления проводника или полупроводника от степени его деформации.

В последние годы получили развитие и другие принципы работы ИПД: волоконно-оптические, индукционные, гальваноманнитные, объемного сжатия, акустические, диффузионные и т.д.

На сегодняшний день самыми популярными в России являются тензорезисторные ИПД.

3.7.1. Емкостные преобразователи давления

Принцип действия емкостных преобразователей основан на изменении емкости переменного конденсатора C под воздействием преобразуемой неэлектрической величины (например, давления). Емкость конденсатора зависит от таких параметров как расстояние между пластинами (обкладками) δ , площадь пластин S , диэлектрическая постоянная между пластинами E .

Наибольшее применение в системах автоматики получили плоскопараллельные и цилиндрические преобразователи. На рис. 3.12 схематически изображено устройство плоскопараллельных емкостных преобразователей, основанных на трех принципах: изменении величины зазора δ между пластинами (обкладками) конденсатора, причем одной из пластин может быть поверхность объекта (детали), не входящего в состав преобразователя (рис. 3.12, а); изменении площади S перекрытия пластин в результате их относительного смещения (рис. 3.12, б); изменении диэлектрической проницаемости материала E (рис. 3.12, в).

Характеристика управления емкостного плоскопараллельного преобразователя с изменяющимся воздушным зазором определяется выражением:

$$C = \frac{E \cdot S}{\delta}, \quad (3.5)$$

где C - емкость конденсатора, Ф; δ - расстояние между обкладками, м; E - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, Ф/м; S — площадь обкладок, м².

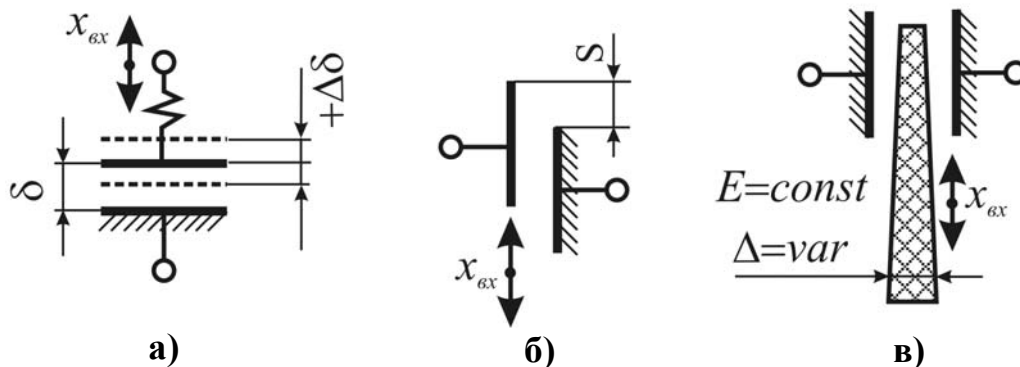


Рис.3.12. Емкостные преобразователи:

а - с изменяющейся величиной зазора; б - с изменяющейся площадью;
в - с изменяющейся диэлектрической проницаемостью

В первом случае емкость изменяется по гиперболическому закону, во втором и третьем – линейно.

Основными достоинствами емкостных преобразователей являются: высокая чувствительность (до 500 В/мм); простота конструкции; малые размеры и масса; малая инерционность; высокая точность и стабильность характеристик.

К недостаткам следует отнести: большое внутреннее сопротивление; влияние на работу преобразователя паразитных емкостей (требуется экранировка); необходимость усиления снимаемого сигнала; потребность источника напряжения высокой частоты; сильное влияние изменения температуры, влажности и загрязненности окружающей среды; для достижения максимальной чувствительности монтаж следует производить короткими проводами, что не всегда удобно.

3.7.2. Пьезоэлектрические преобразователи давления

Действие пьезоэлектрических преобразователей основано на свойстве некоторых кристаллических веществ создавать электрические заряды под действием механической силы. Это явление, называемое пьезоэффектом, характерно для кристаллов кварца, турмалина, сегнетовой соли, титаната бария и некоторых других веществ. Особенностью пьезоэффекта является его безынерционность. Заряды возникают мгновенно в момент приложения силы. Это обстоятельство делает пьезоэлектрические приборы незаменимыми при измерении и исследовании быстропротекающих процес-

сов, связанных с изменением давления (индицирование быстроходных двигателей, изучение явлений кавитации, взрывных реакций и т.п.).

Для изготовления пьезоэлектрических датчиков наиболее широко применяют кварц, сочетающий хорошие пьезоэлектрические свойства с большой механической прочностью, высокими изоляционными свойствами и независимостью пьезоэлектрической характеристики в широких пределах от изменения температуры.

Элементарной структурной ячейкой является шестигранная призма (рис. 3.13).

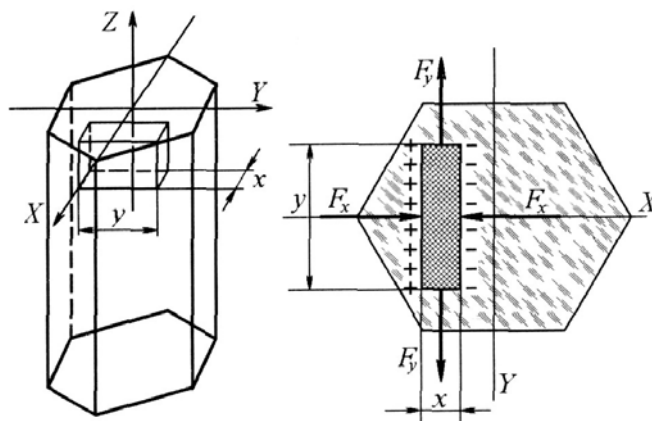


Рис. 3.13. Схема кристалла кварца

В кристаллах кварца различают продольную ось ZZ , называемую оптической осью, ось XX , проходящую через ребра призмы (электрическую ось), и ось YY , проходящую через середины противоположащих граней (механическая или нейтральная). Если из кристалла кварца вырезать параллелепипед так, чтобы его грани были расположены перпендикулярно осям YY и XX , то он будет обладать пьезоэлектрическими свойствами. Силы, приложенные к параллелепипеду в направлении оси ZZ , не вызывают электризации, а растягивающая или сжимающая силы F_x , приложенные в направлении электрической оси, вызывают появление разноименных зарядов на гранях, перпендикулярных к этой оси (продольный пьезоэффект). Заряд, возникающий на гранях, равен:

$$q_x = kF_x = k \cdot P_x \cdot S_x, \quad (3.6)$$

где P_x и F_x - давление и сила, действующие на грань; S_x - площадь грани; k - постоянная величина, так называемый, пьезоэлектрический модуль.

Пьезоэлектрическая постоянная кварца практически не зависит от температуры до 500°C . При температуре выше 500°C она быстро уменьшается и при температуре 570°C становится равной нулю, т. е. кварц теряет

пьезоэлектрические свойства. Пьезоэлектрические приборы позволяют измерять давление до 100 МПа;

3.7.3. Тензорезисторные преобразователи давления

В основе работы тензопреобразователей (тензорезисторов) лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при их механической деформации.

По способу закрепления на чувствительных элементах датчиков они делятся на наклеиваемые и несклеиваемые, по конструктивному выполнению – на проволочные, фольговые, полупроводниковые.

Проволочные тензопреобразователи (рис. 3.14) конструктивно представляют собой отрезок тонкой проволоки l (диаметром 0,02...0,05 мм), которая зигзагообразно наклеена на тонкую бумажную или пленочную основу (подложку) 2. Сверху проволока также закрыта тонкой бумагой или лаковой пленкой 3, или фетром. Для включения в измерительную схему к концам проволоки припаиваются медные выводы 4.

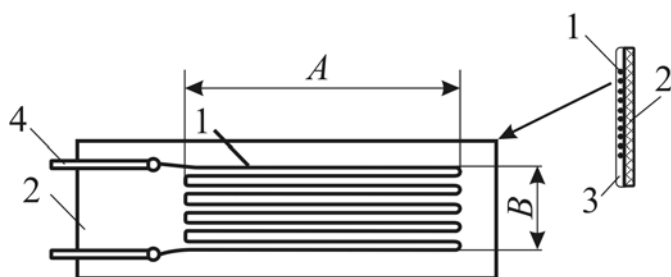


Рис. 3.14. Проволочный тензопреобразователь:
1 – проволока; 2 – подложка;
3 – защитная пленка; 4 – медные выводы

Измерительной базой преобразователя является длина петель решетки A , величина которой лежит в пределах 1,5...100 мм. Ширина решетки B равна 5...10 мм. Номинальное сопротивление 10...1000 Ом, номинальный ток – 30 мА.

Фольговые тензопреобразователи (рис. 3.15) представляют собой дальнейшее развитие проволочных. В них вместо решеток из проволоки применяют решетку из фольги толщиной 0,004...0,012 мм. Рисунок решетки выбирают таким, чтобы можно было снизить деформации, которая в фольговых тензопреобразователях практически сводится к нулю. На рис. 3.15,а представлена типовая форма фольгового тензопреобразователя, на рис. 3.15,б – короткобазовый преобразователь, на рис. 3.15,в – для наклейки на круглую мембрану.

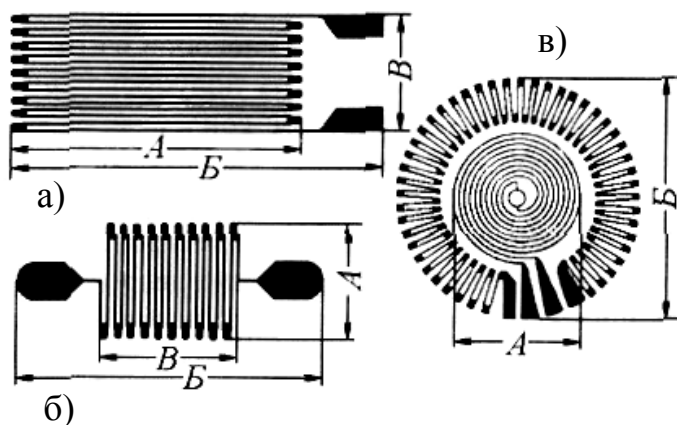


Рис. 3.15. Фольговые тензопреобразователи:
а – типовой; б – короткобазовый;
в – круговой

Фольговые тензопреобразователи могут пропускать больший ток, чем проволочные, благодаря большей площади поперечного сечения проводника при тех же размерах решетки и большей теплоотдаче, улучшающей теплообмен, вследствие большей площади прилегания к деформируемой детали (чувствительному элементу датчика). Благодаря этому можно увеличить значение номинального тока до 0,2 А. Сопротивление фольговых тензопреобразователей равно 30...250 Ом.

В качестве материала решеток проволочных и фольговых тензопреобразователей применяются как чистые металлы (серебро, платина, медь), так и сплавы (константан, нихром, манганин и др.).

Основными достоинствами проволочных и фольговых тензопреобразователей являются: практически полное отсутствие их влияния на деформацию детали; линейность характеристики; низкая стоимость.

Основным недостатком является относительно низкий температурный диапазон работоспособности: от -40 до $+70^{\circ}\text{C}$.

Полупроводниковые тензопреобразователи отличаются от проволочных и фольговых большим (до 50%) изменением сопротивления при деформации и более высоким пределом чувствительности к температуре (в 10...20 раз).

Их преимущества заключаются в более высоком (в 60 раз) коэффициенте тензочувствительности, малых размерах (длина базы $A = 3...10$ мм), больших значениях выходного сигнала.

Наиболее сильно тензоэффект выражен в таких полупроводниковых материалах, как германий, кремний, антимонид индия, фосфид индия, арсенид галлия, антимонид галлия. Для тензопреобразователей чаще применяют германий и кремний в виде пластин толщиной 0,03...0,2 мм, шириной 0,5...1 мм и длиной (базой) 3...15 мм.

Существует несколько способов изготовления полупроводниковых тензопреобразователей: вырезание из полупроводникового монокристалла; выращивание монокристалла посредством конденсации паров; нанесение на некоторые виды подложек тонких пленок со свойствами монокристаллов; получение диффузионным способом. Особенно широкое применение в изготовлении общепромышленных тензорезисторных ИПД в силу своих высоких механических, изолирующих и теплоустойчивых качеств получила технология КНС — «кремний на сапфире». Упрощенная конструкция чувствительного элемента тензопреобразователя, основанного на данной технологии, представлена на рис. 3.16. Чувствительный элемент состоит из сапфировой подложки 3, на которую диффузионным способом нанесены тензорезисторы 4 (чаще всего в виде уравновешенного измерительного моста Уитстона). Подложка припаяна твердым припоем 2 к титановой мембране 1.

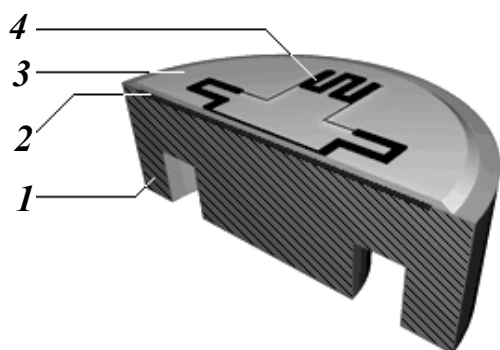


Рис. 3.16. Чувствительный элемент полупроводникового тензопреобразователя:

1 – титановая мембрана; 2 – серебростержащий припой; 3 – сапфировая подложка; 4 – тензорезисторы

Чувствительный элемент включается в общую измерительную цепь преобразователя давления, структурная схема которого представлена на рис. 3.17.

Деформация измерительной мембраны под воздействием внешнего давления P приводит к локальным деформациям тензорезисторного моста, состоящего из постоянных тензорезисторов R_2 , R_3 , R_4 и переменного R_1 . В результате происходит разбаланс моста, который преобразуется электронным блоком и в унифицированный выходной электрический сигнал.

К преимуществам данного типа чувствительных элементов можно отнести достаточно высокий температурный диапазон работоспособности (от -160 до $+1500^\circ\text{C}$), хорошую защищенность чувствительного элемента от воздействия любой агрессивной среды, налаженное серийное производство, низкую стоимость.

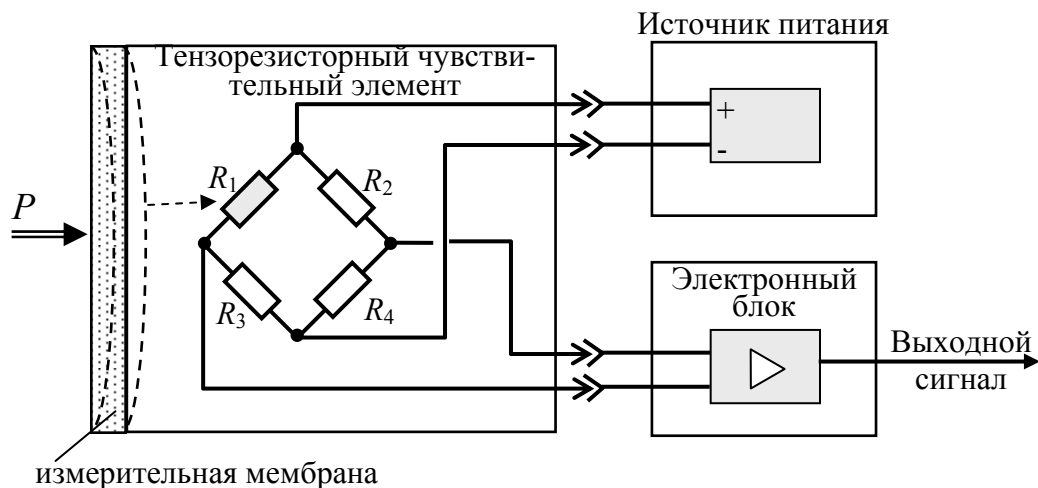


Рис. 3.17. Структурная схема тензорезисторного преобразователя давления

Основными недостатками полупроводниковых тензопреобразователей являются: малая гибкость, небольшая механическая прочность, нелинейность характеристики, большой разброс характеристик однотипных преобразователей, нестабильность параметров.

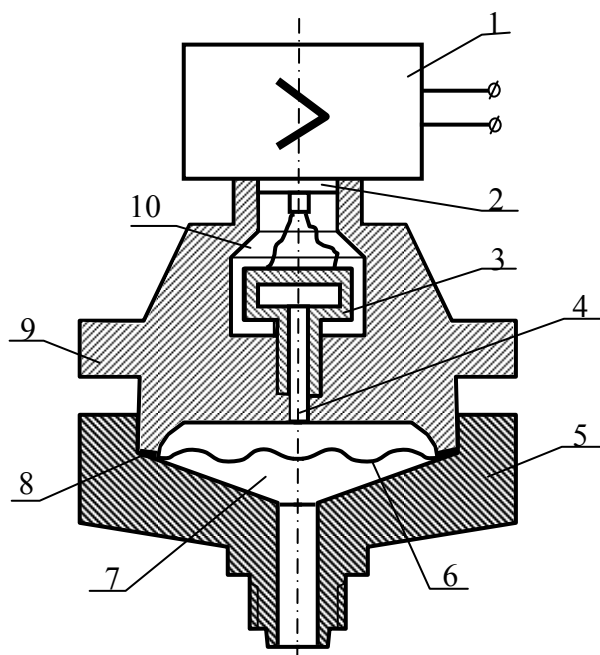


Рис. 3.18. Конструкция измерительного преобразователя давления:

1 – электронный блок; 2 – гермовывод; 3 – тензопреобразователь; 4 – канал; 5 – фланец; 6 – измерительная мембрана; 7 – измерительная камера; 8 – прокладка; 9 – основание; 10 – внутренняя полость.

дается в камеру 7 фланца 5, который уплотнен прокладкой 8. Измеряемое давление воздействует на мембрану 6 и через жидкость воздействует на

Несмотря на данные недостатки, основная масса датчиков давления в нашей стране выпускаются на основе тензорезисторных чувствительных элементов. Конструкция одной из моделей такого датчика представлена на рис. 3.18.

Мембранный тензопреобразователь 3 размещен внутри основания 9. Внутренний канал 4 тензопреобразователя заполнен кремнийорганической жидкостью и отделен от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, приваренной по наружному контуру к основанию 9. Полость 10 сообщена с окружающей атмосферой. Измеряемое давление по-

мембрану тензопреобразователя, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронный блок 1 по проводам через гермовывод 2.

3.8. Грузопоршневой манометр

Принцип действия грузопоршневого манометра основан на уравновешивании сил, создаваемых, с одной стороны, измеряемым давлением, а с другой стороны - грузами, действующими на поршень, помещенный в цилиндр (рис 3.19).

Прибор состоит из колонки 7 с цилиндрическим шлифованным каналом и поршня 6, несущего на своем верхнем конце тарелку 4 для нагружения ее эталонными грузами 5. Поршень 1 винтового пресса служит для подъема и опускания поршня 6 так, чтобы при любых нагрузках поршень 6 был погружен в цилиндр примерно на 2/3 своей высоты.

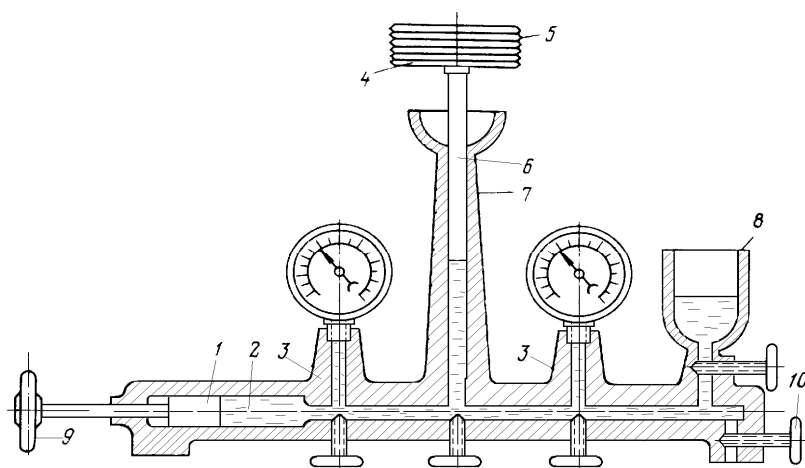


Рис.3.19. Грузопоршневой манометр:

1,6 – поршень; 2 – камера; 3 – штуцер; 4 – тарелка; 5 – грузы;
7 – колонка; 8 – воронка; 9 – маховик; 10 – вентиль

Камеру 2 поршневого манометра заполняют трансформаторным, вазелиновым или касторовым маслом через воронку 8. Давление в системе создают с помощью винта с маховиком 9 и поршня 1. Штуцеры 3 служат для установки поверяемого и образцового манометров. Вентиль 10 предназначен для слива масла. В процессе измерений для устранения вредных сил трения поршня 6 о стенки цилиндрического канала колонки 7 поршень 6 вручную приводят во вращение. Грузопоршневой манометр может быть использован для проверки манометров, как с помощью грузов, так и с помощью образцового манометра.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют единицы измерения давления?
2. Как классифицируются средства измерения давления?
3. Как классифицируются манометры?
4. Что такое измерительный преобразователь давления и какие преобразователи вы знаете?
5. Что произойдет, если U-образный манометр соединить с полостью, давление в которой ниже атмосферного?
6. От чего зависит погрешность чашечного манометра?
7. Что является чувствительным элементом в деформационных приборах?
8. Назовите недостатки мембранных и сильфонных чувствительных элементов приборов.
9. Сравните коэффициенты преобразования мембраны, мембранной коробки, мембранного блока.
10. Основной критерий выбора деформационных преобразователей давления для измерений?
11. Выйдет ли из строя мембранный блок дифманометра, если перепад давления на нем превысит верхний предел измерения?
12. Почему в мембранном разделителе нельзя применять жесткую мембрану?
13. Что такое коэффициент запаса деформационного чувствительного элемента?
14. Что такое жесткость сильфона?
15. Где должен быть расположен манометр по отношению к месту отбора, если измеряемая среда - жидкость?
16. Можно ли дифманометром измерить давление, разрежение?
17. Какие электрические датчики давления вы знаете?
18. На чем основан принцип действия пьезоэлектрических датчиков давления? Емкостных датчиков давления?
19. Что лежит в основе работы тензорезисторных преобразователей?
20. Какие существуют тензорезисторные преобразователи?
21. Принцип действия грузопоршневого манометра?
22. Область применения грузопоршневых манометров?
23. Из каких измерительных преобразователей можно составить измерительную цепь для передачи результатов измерения на щит оператора при нормальных условиях производства? В условиях взрывоопасного производства?

4. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА

4.1. Основные понятия, единицы измерения

Количество вещества выражают в единицах объема или массы. В системе СИ за единицу объема принят кубический метр (м^3), а за единицу массы - килограмм (кг). Количество газа измеряют объемным методом. Для получения сравнимых результатов измерений необходимо объем газа привести к следующим нормальным условиям: температура 20°C ($293,15\text{ K}$), давление 101325 Па (760 мм рт. ст.), относительная влажность $\varphi=0$.

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

Расходом вещества называется количество вещества, проходящее через данное сечение канала в единицу времени. Объемный расход Q определяется как произведение скорости потока v на площадь отверстия истечения S , т.е.

$$Q=vS. \quad (4.1)$$

Объемный расход в системе СИ измеряется в $\text{м}^3/\text{с}$ (в произвольных условиях чаще используется единица $\text{м}^3/\text{ч}$).

Массовый расход Q_m получают умножением объемного расхода Q на плотность ρ жидкости, газа или пара, т.е.

$$Q_m=Q\rho. \quad (4.2)$$

За единицу измерения массового расхода принят $\text{кг}/\text{с}$ (на практике чаще используется $\text{т}/\text{ч}$).

Приборы, измеряющие расход, называются **расходомерами**. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются расходомерами со счетчиком. Такие расходомеры позволяют измерять расход и количество вещества.

В зависимости от принятого метода измерения приборы для измерения расхода и количества подразделяются на:

- расходомеры переменного перепада давления;
- расходомеры постоянного перепада давления;
- бесконтактные расходомеры: электромагнитные, ультразвуковые;
- кориолисовы расходомеры;
- вихревые расходомеры;
- калориметрические расходомеры и др.

4.2. Измерение количества жидкости и газа

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

Номинальным называется наибольший длительный расход, при котором погрешность измерения не выходит за пределы установленных норм, а потеря напора не создает в счетчике усилий, приводящих к быстрому износу его деталей. **Характерным расходом** называется количество вещества, которое проходит через счетчик за 1 ч при установившемся потоке и потере напора 0,1 МПа. Характерный расход является условной величиной и служит мерой оценки счетчиков различных конструкций.

Потери напора представляют собой разность давлений на входе в счетчик и выходе из него.

Калибром счетчика называется диаметр условного прохода входного патрубка, выраженный в миллиметрах.

4.2.1. Скоростные счетчики для жидкостей

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

$$Q = v_{cp} S, \quad (4.3)$$

где v_{cp} - средняя скорость движения вещества, м/с; S - поперечное сечение потока, м².

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

$$n = c v_{cp},$$

с учетом уравнения (4.1)

$$n = c (Q/S),$$

где n - число оборотов вертушки; c - коэффициент пропорциональности, характеризующий механические и гидравлические свойства прибора.

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

На рис.4.1 показан скоростной **счетчик с винтовой вертушкой**, закреплённой на горизонтальной оси. В корпусе 1, снабженном фланцами для присоединения к трубопроводу, установлена вертушка 2 с лопастями, изогнутыми по винтовой линии. Вертушку изготавливают из пластмассы при рабочей температуре до 30°C и из латуни при более высоких температурах. На ось вертушки перед задним закрытым подшипником 3, закрепленным в крестовине 4, насажен червяк 5, сцепляющийся с червячной шестерней, передающей вращение передаточному механизму 6. От механизма движение передается оси, проходящей через сальник 7, и счетному механизму 8. Перед вертушкой со стороны входа жидкости установлен струевыпрямитель 9, состоящий из нескольких радиально закрепленных прямых пластин. Конец одной из пластин струевыпрямителя поворачивается вокруг вертикальной оси, образуя лопасть 11, служащую для регулирования счетчика через рычажный привод 12. В струевыпрямителе закреплен передний подшипник 10 оси вертушки.

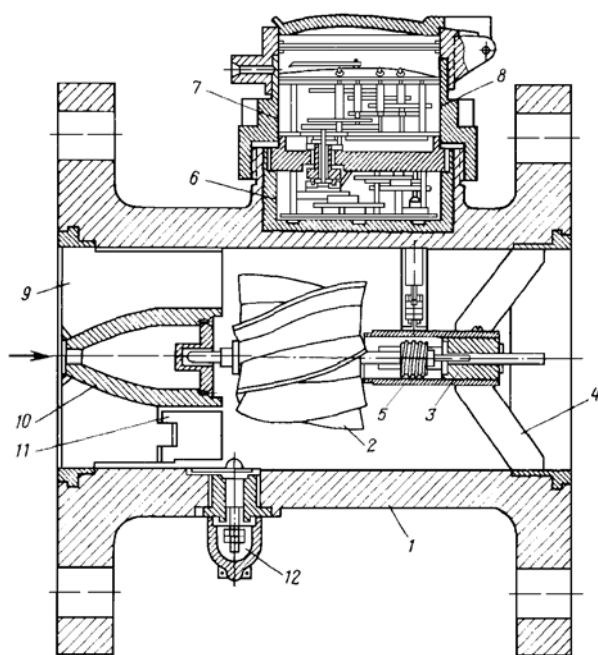


Рис.4.1. Скоростной счётчик с винтовой вертушкой:

- 1-корпус; 2-вертушка;
- 3-подшипник; 4-крестовина;
- 5-червяк; 6-передаточный механизм;
- 7- сальник; 8-счётный механизм;
- 9-струевыпрямитель; 11-лопасть;
- 12-рычажный привод

Механическое сопротивление (трение в подшипниках, сальнике и т.п.) влияет на скорость вращения вертушки, а при некоторой минимальной скорости потока вертушка будет неподвижна.

Механическое сопротивление (трение в подшипниках, сальнике и т.п.) влияет на скорость вращения вертушки, а при некоторой минимальной скорости потока вертушка будет неподвижна.

В зависимости от способа подвода жидкости счетчики с крыльчатой вертушкой подразделяются на одноструйные и многоструйные.

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

трубопроводов. Счетчики с винтовой вертушкой применяют при давлении жидкости до 1,0 МПа и при длительной нагрузке до 600 м³/ч. Погрешность счетчиков составляет 2 - 3% действительного значения.

4.2.2. Объемные счетчики для жидкостей

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

Объемные счетчики выпускаются двух типов, лопастные и с овальными зубчатыми колесами. Принцип действия **лопастных счетчиков** основан на том, что поток измеряемой жидкости, поступая через входной патрубок, проходит через измерительную камеру, где теряет часть напора на создание крутящего момента, приводящего во вращение ротор с подвижными лопастями.

Измерение объемного количества жидкости происходит при периодическом отсечении определённых объемов жидкости, заключенных в полости между двумя лопастями и цилиндрическими поверхностями измерительной камеры и барабана. За один полный оборот ротора отсекаются четыре объема, сумма которых равна емкости измерительной камеры. На рис. 4.2 показано несколько положений ротора, иллюстрирующих части цикла, в течение которого ротор совершает пол-оборота, что соответствует половине ёмкости измерительной камеры.

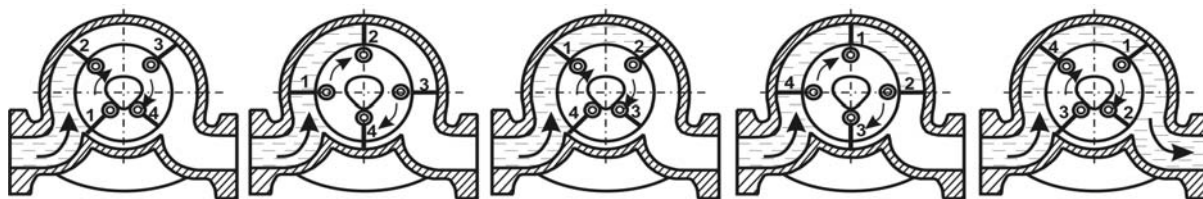


Рис.4.2. Лопастной счетчик

На рис.4.3 показан счетчик с овальными зубчатыми колесами. Проходя через счетчик, поток жидкости теряет часть своей энергии на вращение овальных колес. В зависимости от расположения колес относительно входа потока жидкости каждое из них является поочередно то ведущим, то ведомым.

При вращении овальных колес периодически отсекается определенный объем жидкости, ограниченный овалом колеса и стенкой измерительной камеры. За один оборот колес отсекается четыре определенных объема

жидкости, которые в сумме равны свободному объему измерительной камеры, счетчика.

Количество жидкости, прошедшей через счетчик, определяют по числу оборотов овальных колес. В положении I жидкость вращает правое колесо по часовой стрелке, а правое колесо вращает левое против часовой стрелки. В этом положении правое колесо отсекает определенный объем жидкости *1*.

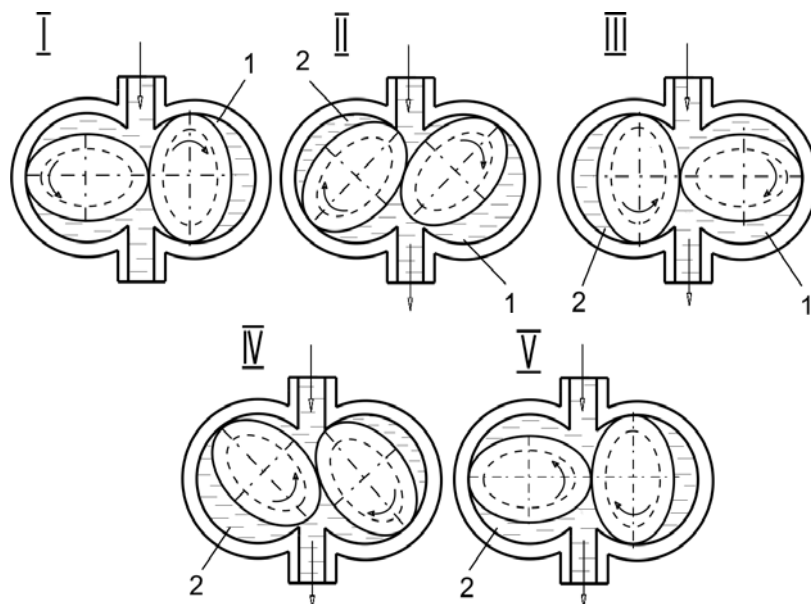


Рис.4.3. Счетчик с овальными зубчатыми колесами

В положении II левое колесо заканчивает отсекание нового объема жидкости *2*, а правое выталкивает ранее отсеченный его объем жидкости *1* в выходной патрубок счетчика. В этом положении крутящий момент передается на оба колеса. В положении III ведущим является левое колесо, которое к этому времени уже отсекло объем *2*. Оно вращает правое колесо по часовой стрелке. Дальнейшее вращение колес происходит аналогично (положения IV и V).

Для измерения объемов очень вязких жидкостей (мазут и др.) в счетчиках предусматривают паровую рубашку. Счетчики с овальными колесами выпускаются промышленностью для различных диаметров трубопроводов при рабочем давлении до 1,57 МПа. Потеря напора от установки счетчика составляет примерно 0,02 МПа. Погрешность показаний этих приборов $\pm 0,5\%$.

4.2.3. Барабанные счетчики для газов

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

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

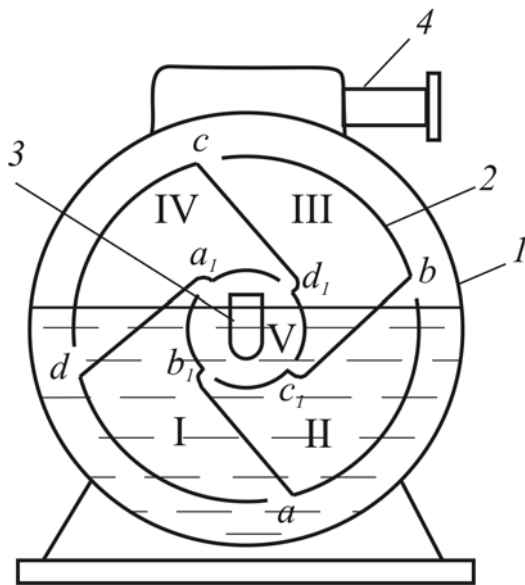


Рис.4.4. Барабанный счетчик:
1-кожух; 2-барабан;
3-подающая газ труба;
4-отводящая газ труба;
I-V - камеры

В камеру V через полую ось входит подающая газ труба 3, а в верхней части кожуха установлена отводящая труба 4. Радиальные перегородки и соединяющие щели расположены так, что газ последовательно заполняет камеры I - IV. Перепад давлений в трубах 3 и 4 заставляет барабан вращаться по часовой стрелке. Входная и выходная щели каждой камеры никогда не могут быть одновременно над уровнем жидкости, следовательно, прямой переток газа из трубы 3 в трубу 4 исключается. Каждая камера заполняется определенным постоянным объемом газа, вытесняемым из камеры

в кожух прибора при выходе выпускной щели из под уровня запирающей жидкости. Вращение барабана 2 передается счетному механизму, расположенному снаружи кожуха. За один оборот через барабан проходит объем газа, равный сумме объемов камер, отсекаемых жидкостью. Запирающей жидкостью служит обычно вода. В случае опасности замерзания воды используют водный раствор хлорида магния или глицерин. Барабанные счетчики применяют для измерения светильного, газогенераторного, коксового и других нейтральных газов, заметно не растворяющихся в затворной жидкости и не воздействующих на материал счетчика. Обязательным условием работы барабанных газовых счетчиков является постоянство уровня жидкости в кожухе счетчика. Для контроля уровня жидкости счетчик снабжа-

ют водомерным стеклом или устройством для поддержания постоянства уровня.

Барабанные счетчики газа представляют собой очень точные приборы, их погрешность не превышает 0,2%. Однако, они редко выпускаются производительностью более 3 м³/ч, так как при большой производительности габариты их слишком велики.

4.2.4. Ротационные счётчики для газов

Из счетчиков для газов наиболее распространены ротационные счетчики (рис. 4.5). Они предназначены для измерения больших количеств газа. Счетчик состоит из кожуха 2, внутри которого вращаются на параллельных горизонтальных валах роторы 1. Валы роторов связаны зубчатыми колесами, находящимися вне кожуха. От одного из валов вращение передается счетному механизму. Шарико- или роликоподшипники валов, а также зубчатые колеса находятся в масляных ваннах и заключены в картеры. Тонкий валик, соединяющий вал ротора со счетным механизмом, проходит через сальник в стенке картера. Зазор между роторами и кожухом очень мал (порядка 0,12 мм).

В положении, изображенном на схеме, правый ротор не вращается под действием газа (давления на обе стороны ротора одинаковые). На верхнюю часть левого ротора действует газ с более высоким давлением,

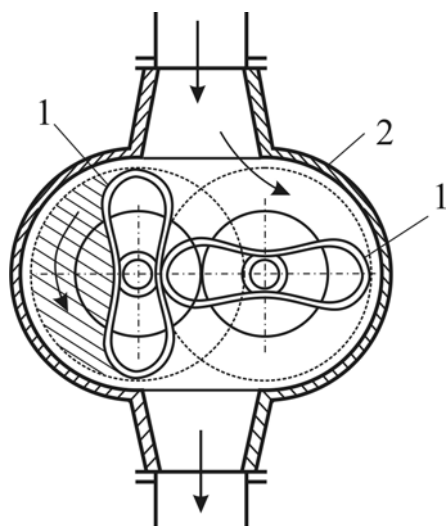


Рис.4.5. Принципиальная схема ротационного счетчика:

1-роторы; 2-кожух

чем на нижнюю; левый ротор поворачивается, увлекая за собой правый. Когда правый ротор стоит вертикально (а левый горизонтально), то он поворачивает левый. За один оборот обоих роторов объем газа, прошедшего через прибор, равен объему измерительной камеры счетчика. Перепад давлений газа в счетчике контролируется дифференциальным манометром.

Ротационные счетчики применяют для измерения расхода газа от 40 до 10 000 м³/ч. Погрешность измерений составляет $\pm 2-3$ %. Счетчик допускает кратковременную перегрузку до 30 %.

4.2.5. Насосы - дозаторы

Насосы-дозаторы с возвратно-поступательным движением поршня (рис.4.6) служат для дозирования различных химически активных жидкостей. На всасывающей и нагнетательной линиях этих насосов установлены

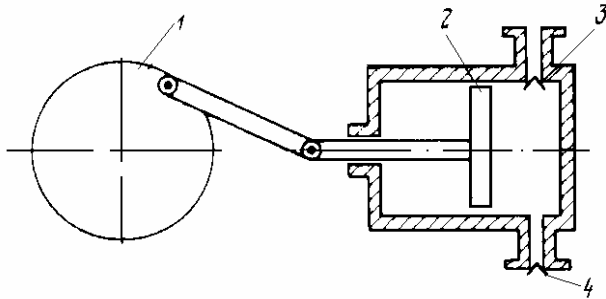


Рис.4.6 Насос-дозатор:

- 1-привод; 2-поршень;
- 3-входной клапан;
- 4-выходной клапан

клапаны. Когда привод 1 перемещает поршень 2 справа налево, происходит наполнение цилиндра через входной клапан 3, а когда поршень, достигнув крайнего положения, перемещается слева направо, клапан 3 на входе закрывается, а клапан 4 на выходе открывается, и жидкость вытеснится в приемное устройство.

4.3. Измерение расхода жидкости и газа

4.3.1. Расходомеры переменного перепада давления

Из парка существующих расходомеров более 60% составляют расходомеры переменного перепада давления. Такое широкое их применение объясняется невысокой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации, а также отсутствием необходимости в дорогостоящих образцовых установках для градуировки. Из более чем двухсот типов используемых в мировой практике расходомеров, эти расходомеры являются единственными нормализованными средствами измерения расхода.

Измерение расхода по этому методу основано на изменении потенциальной энергии (статического давления) вещества, протекающего через сужающее устройство в трубопроводе. Сужающим устройством называется техническое устройство, устанавливаемое в измерительном трубопроводе, со сквозным отверстием для создания перепада давления среды путем уменьшения площади сечения трубопровода (сужения потока).

В измерительной технике в качестве сужающих устройств (первичных преобразователей) используют диафрагмы, сопла, сопла и трубы Вентури.

Диафрагма (рис. 4.8) представляет собой тонкий диск, установленный в трубопроводе так, чтобы отверстие в диске было концентрично внутреннему контуру сечения трубопровода.

При измерении расхода по методу переменного перепада давлений протекающее вещество должно полностью заполнять все сечение трубопровода и сужающего устройства; поток в трубопроводе должен быть практически установившимся; фазовое состояние веществ не должно изменяться при прохождении их через сужающее устройство (жидкость не должна испаряться, пар должен оставаться перегретым и т.п.).

Сужение потока (рис. 4.7) начинается до диафрагмы (сечение I-I); затем на некотором расстоянии за ней (сечение II-II) благодаря действию сил инерции поток сужается до минимального сечения (диаметр d_2), а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и за ней образуются зоны с вихревым движением, причем зона вихрей за диафрагмой больше, чем перед ней.

Давление потока около стенки трубопровода несколько возрастает до величины P_1 из-за подпора перед диафрагмой и снижается до минимального значения P'_2 за диафрагмой в наиболее узком сечении потока.

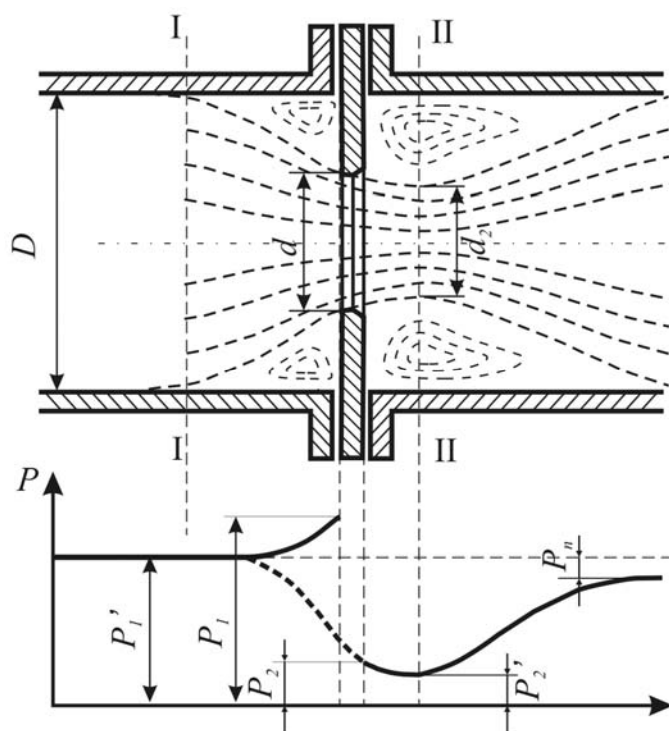


Рис.4.7. Вид потока и изменение давления при прохождении потока через сужающее устройство

Далее, по мере расширения струи, давление потока около стенки снова повышается, но не достигает прежнего значения. Потеря части давления P_n определяется, главным образом, потерей энергии на трение и завихрения.

Изменение давления потока по оси трубопровода практически совпадает с изменением давления около его стенки, за исключением участка перед диафрагмой и непосредственно в ней, где давление потока по оси трубы снижается (штриховая линия). Разность давлений ($P'_1 - P'_2$) яв-

ляется перепадом, зависящим от расхода протекающей через трубопровод среды. По конструктивным соображениям и в виду невозможности практического определения зоны для измерения P'_2 в расчет принимается перепад давления $(P_1 - P_2)$, т.е. непосредственно около стенок трубопровода до и после сужающего устройства.

Компенсация разницы между $(P'_1 - P'_2)$ и $(P_1 - P_2)$ достигается введением поправочных коэффициентов.

Теория и основные уравнения метода переменного перепада давлений одинаковы для сужающих устройств всех видов; различаются лишь некоторые коэффициенты в уравнениях, определяемые опытным путем.

Выведем уравнение расхода для случая, когда в трубопроводе установлена диафрагма, и по трубопроводу протекает несжимаемая жидкость, плотность которой ρ до и после сужения остается неизменной.

Запишем уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости при постоянной плотности и отсутствии обмена энергии с окружающей средой с учетом потерь и неравномерности распределения скоростей для сечений I и II горизонтального трубопровода:

$$\frac{P_1}{\rho} + \phi_1 \frac{v_1^2}{2} + \psi_1 \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \phi_2 \frac{v_2^2}{2} + \psi_2 \frac{v_2^2}{2} + \xi \frac{v_2^2}{2}, \quad (4.4)$$

где v_1, v_2 – средние скорости потока в сечениях I и II соответственно; ϕ_1, ϕ_2 – коэффициенты Кориолиса, равные отношению действительной кинетической энергии потока к его средней кинетической энергии в указанных сечениях потока; ψ_1, ψ_2 – доли скоростного напора до и после сужающего устройства, учитывающие разность значений измеренного давления от давления в сечениях I и II; $\xi v_2^2/2$ – потери кинетической энергии на участке I-II; ξ – коэффициент сопротивления.

Из условия неразрывности струи следует:

$$S_1 v_1 = S_0 v_0 = S_2 v_2,$$

где S_1, S_0, S_2 – площади поперечного сечения соответственно трубопровода, отверстия диафрагмы и наиболее суженного места струи.

Отношение $S_0/S_1 = \beta^2$ называется относительной площадью сужающего устройства (коэффициент $\beta = d/D$ называется относительным диаметром отверстия сужающего устройства), а отношение $S_2/S_0 = \mu$ – коэффициентом сужения потока.

С учетом этих коэффициентов значения скорости потока v_1 и v_2 через скорость v_0 в отверстии диафрагмы площадью сечения S_0 рассчитываются по формулам:

$$v_1 = v_0 \beta^2, \quad (4.5)$$

$$v_2 = v_0 \mu. \quad (4.6)$$

Подставив (4.5) и (4.6) в уравнение (4.4) и решив его относительно v_0 , получим:

$$v_0 = \frac{\mu}{\sqrt{\phi_2 + \psi_2 + \xi - \phi_1 \beta^4 \mu^2 - \psi_1 \beta^4 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (4.7)$$

Подставив (4.7) в уравнение (4.1) для вычисления объемного расхода, получим расход, проходящий через отверстие сужающего устройства

$$Q = S_0 v_0 = S_0 \frac{\mu}{\sqrt{\phi_2 + \psi_2 + \xi - \phi_1 \beta^4 \mu^2 - \psi_1 \beta^4 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (4.8)$$

Умножив и разделив правую часть уравнения (4.8) на коэффициент скорости входа

$$E = \sqrt{\frac{1}{1 - (S_0 / S_1)^2}}$$

получим следующее уравнение:

$$Q = S_0 C E \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)},$$

где

$$C = \frac{\mu \sqrt{1 - \beta^4}}{\sqrt{\phi_2 + \psi_2 + \xi - \phi_1 \beta^4 \mu^2 - \psi_1 \beta^4 \mu^2}}$$

называется коэффициентом истечения. Существующие теоретические методы расчета коэффициента истечения, как правило, не обеспечивают достаточную для практики точность. Поэтому значения коэффициентов истечения, стандартизованные в отечественных и зарубежных нормативных документах, являются результатом обработки высокоточных многочисленных экспериментальных исследований.

Произведение $\alpha = CE$ называется коэффициентом расхода. Коэффициент расхода учитывает неравномерное распределение скоростей по сечению потока, обусловленное вязкостью жидкости и трением о стенки трубопровода, измерение давления не в центре потока, а у стенок трубопровода и введение в уравнение расхода сечения S_0 вместо неопределенно-

го наименьшего сечения струи S_2 . Коэффициент расхода для сужающих устройств различных типов определяют опытным путем.

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

$$Q = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} ; \quad (4.9)$$

$$Q_M = \alpha S_0 \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)} , \quad (4.10)$$

При выводе уравнения (4.9) было сделано допущение, что плотность среды при ее течении через сужающее устройство не изменяется. Это допущение справедливо для несжимаемых сред. Для газов такое допущение может привести к значительной неопределенности результатов измерений. Поэтому, при измерении расхода сжимаемых сред (газов и паров), особенно при больших перепадах давлений в сужающем устройстве, необходимо учитывать уменьшение плотности ρ , вызванное снижением давления при прохождении через сужающее устройство, поэтому массовый расход (а также объемный), отнесенный к начальному значению ρ , несколько уменьшится.

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

$$Q = \alpha s_0 \varepsilon \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (P_1 - P_2)} ; \quad (4.11)$$

$$Q_M = \alpha s_0 \varepsilon \sqrt{2\rho_1 (P_1 - P_2)} , \quad (4.12)$$

где ε - поправочный множитель на расширение измеряемой среды, называемый коэффициентом расширения; ρ_1 - плотность потока перед входом потока в отверстие сужающего устройства.

Уравнения (4.11) и (4.12) действительны до тех пор, пока скорость потока в сужающем устройстве остается меньше критической, т.е. меньше скорости звука в данной среде. Уравнения расхода для газов и паров отличаются от уравнений расхода для несжимаемой жидкости только коэффициентом ε . Значения коэффициента расширения ε для различных сужающих устройств и разных случаев измерения даны в справочниках.

Стандартные сужающие устройства.

Для всех стандартных сужающих устройств коэффициенты расхода в широком диапазоне достаточно достоверны и воспроизводимы, поэтому указанные устройства можно применять без индивидуальной градуировки.

К стандартным (нормализованным) сужающим устройствам относятся диафрагмы (ГОСТ 8.586.2-2005), сопла и сопла Вентури (ГОСТ 8.586.3-2005), а также трубы Вентури (ГОСТ 8.586.4-2005).

Стандартные диафрагмы (рис.4.8) являются самым распространенным типом сужающего устройства. Она представляет собой тонкий металлический диск с круглым концентрическим отверстием, которое имеет со стороны входа острую цилиндрическую кромку, а далее расточено под углом $\varphi = 30 \div 60^\circ$. Диафрагмы бывают двух основных типов: камерные (рис. 4.8, а) и бескамерные (рис. 4.8, б). Бескамерные диафрагмы отличаются от камерных отсутствием кольцевых камер, а также наличием металлического ушка, приваренного к боковой поверхности диска.

Камерные диафрагмы используются для трубопроводов с условным диаметром D_y от 50 до 500 мм, а бескамерные - от 300 до 1000 мм.

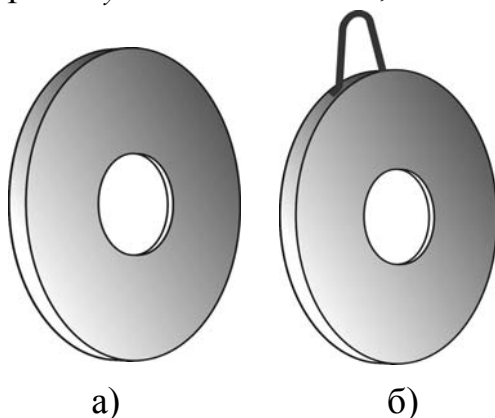


Рис. 4.8. Диафрагмы:
а – камерная; б – бескамерная.

Камерная диафрагма состоит из диска и корпусов кольцевых камер (рис. 4.9), служащих для замера статического давления.

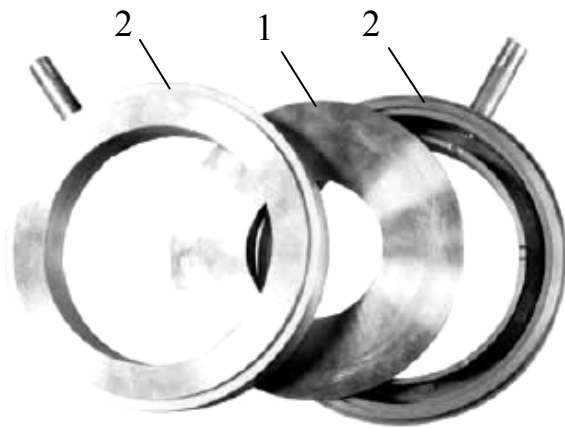


Рис. 4.9. Камерная диафрагма:
1 – диск; 2 – кольцевые камеры.

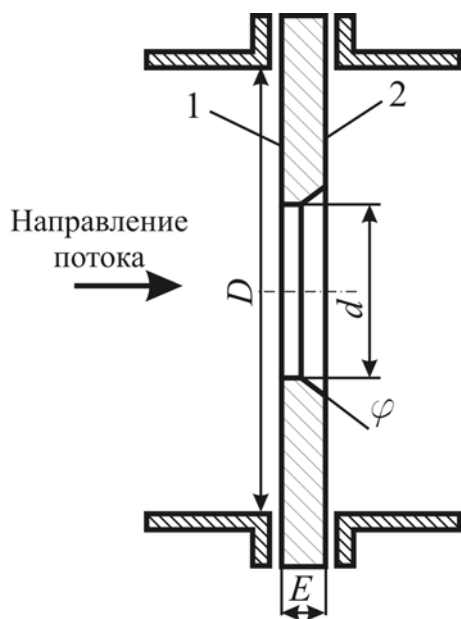


Рис.4.10. Сечение диафрагмы:
1 - входной торец диафрагмы;
2 - выходной торец диафрагмы

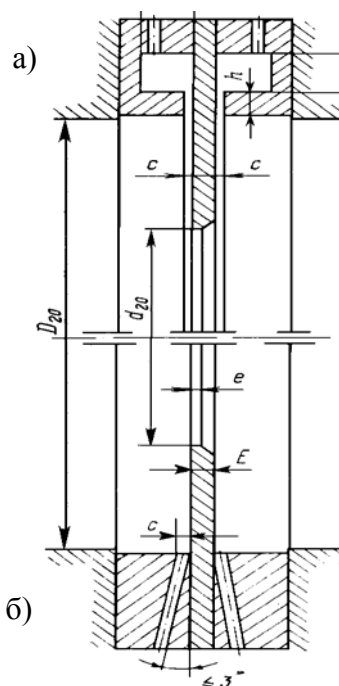


Рис.4.11. Отбор давления:
а - диафрагма с фланцевым
способом отбора давления;
б - диафрагма с угловым
способом отбора давления

входе в него должно быть больше или равно 0,75.

Поперечное сечение в осевой плоскости стандартной камерной диафрагмы приведено на рис. 4.10.

Толщина диафрагмы E не должна превышать $0,05D$, где D – диаметр трубопровода. Диаметр отверстия диафрагмы d должен быть больше 12,5 мм. Определение этого диаметра – сложная расчетная процедура, определяемая ГОСТом.

Диафрагму можно изготавливать из любых материалов, при выборе которых следует учитывать свойства контролируемой среды. Разъедание (притупление) острой входной кромки резко изменяет коэффициент φ , измерения становятся неточными. Наиболее подходящие материалы – нержавеющие стали (например, 12Х18Н9Т).

При измерении расхода газов и жидкостей допускается применять как угловой (рис.4.11,а), так и фланцевый (рис.4.11,б) способы отбора перепада давлений на диафрагмах.

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

Допустимые интервалы диаметров трубопроводов D и коэффициента β для диафрагм должны находиться в следующих пределах: $50 \text{ мм} \leq D \leq 1000 \text{ мм}$; при $0,1 \leq \beta \leq 0,75$.

В случае измерения расхода газа отношение абсолютных давлений на выходе из сужающего устройства и

Стандартное сопло (рис.4.12) – тип стандартного сужающего устройства, имеющего плавно сужающуюся часть на входе, переходящую на выходе в горловину. Сопла могут применяться без индивидуальной градуировки в трубопроводах $50 \text{ мм} \leq D \leq 630 \text{ мм}$, при условии, что $0,2 \leq \beta \leq 0,65$.

Сопло особенно удобно для измерения расхода газов и перегретого пара, если $((P_1 - P_2)/P_1) < 0,1$, а также для измерения расхода пара высокого давления и агрессивных газов в трубопроводах диаметром $D \leq 200 \text{ мм}$.

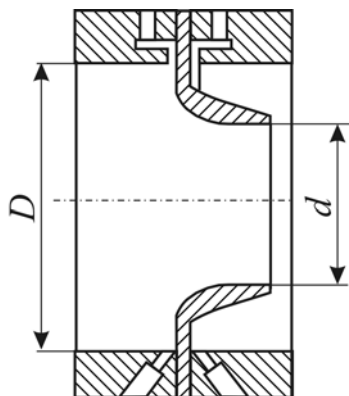


Рис.4.12.Стандартное сопло

По сравнению с диафрагмами они менее чувствительны к коррозии, загрязнениям и обеспечивают несколько большую точность измерения.

Профильная часть отверстия сопла должна быть выполнена с плавным сопряжением дуг. Поверхность входной части сопла не должна быть шероховатой; для цилиндрической части исключается конусность. Выходная кромка цилиндрической части отверстия должна быть острой, без заусенцев, фаски или закругления. Для изготовления сопел обычно применяют те же материалы, что и для диафрагм.

Стандартное сопло Вентури (рис.4.13) - сопло, которое состоит из входной части в виде сопла, горловины и выходной части в виде расходящегося конуса (диффузора).

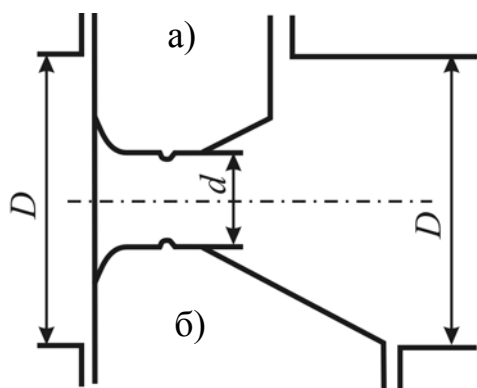


Рис.4.13 Сопло Вентури:
а – короткое;
б – длинное

Они могут применяться без индивидуальной градуировки для диаметров трубопроводов $65 \text{ мм} \leq D \leq 500 \text{ мм}$, при $0,316 \leq \beta \leq 0,775$ и при $d \geq 50 \text{ мм}$.

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

Стандартные **трубы Вентури** (рис.4.14) можно применять в трубопроводах диаметром от 50 до 1200 мм при условии, что $0,3 \leq \beta \leq 0,75$. Труба Вентури называется длинной, если наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода, или короткой, если указанный диаметр меньше диаметра трубопровода.

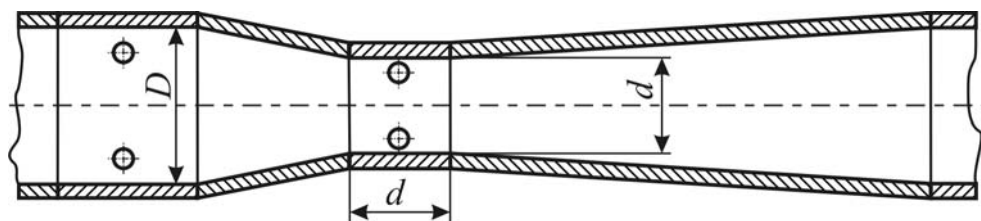


Рис.4.14.Труба Вентури

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

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

Комплектация расходомера.

Расходомер переменного перепада давления (рис.4.15) состоит из следующих основных частей: измерительных участков трубопровода 1 до и после сужающего устройства, сужающего устройства 2, импульсных линий 3, служащих для соединения с дифманометром измерительных участков трубопровода, дифференциального манометра 4.

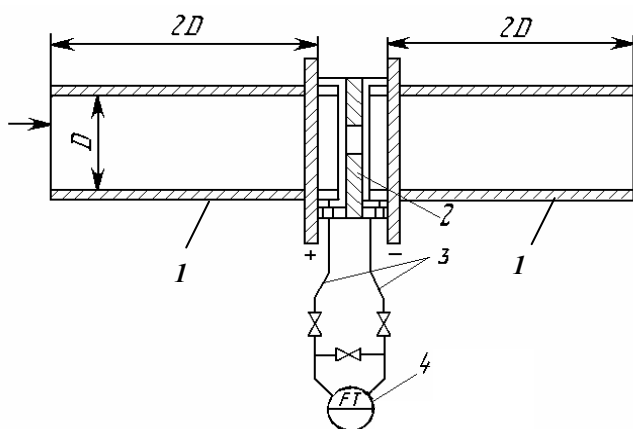


Рис.4.15. Комплектация расходомера переменного перепада давления:

- 1-участок трубопровода;
- 2-сужающее устройство;
- 3-импульсные линии;
- 4- дифференциальный манометр

Требования к исполнению монтажа измерительных участков трубопровода изложены в ГОСТ 8.586.1-5-2005. В них устанавливаются требования к выполнению расходомерных устройств при их разработке, проектировании, монтаже, эксплуатации и поверке.

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

Заполнение дифманометра уравнивающей жидкостью, его монтаж и подключение к соединительным линиям для измерения перепада давлений на сужающем устройстве следует производить в соответствии с руководством по монтажу и эксплуатации прибора.

Выбор дифманометра по параметрам окружающей среды и его применения для заданных рабочих условий измерения расхода должны соответствовать требованиям технической документации завода-изготовителя.

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

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

4.3.2. Расходомеры постоянного перепада давления

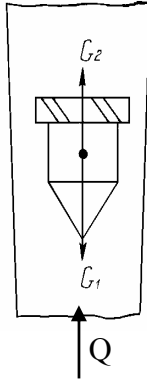


Рис.4.16. Принципиальная схема ротаметра

Наиболее распространёнными приборами этой группы являются расходомеры со свободно перемещающимся в корпусе поплавком (ротаметры). Принципиальная схема ротаметра показана на рис.4.16. Проходящий через ротаметр снизу поток жидкости или газа поднимает поплавок вверх до тех пор, пока расширяющаяся кольцевая щель между телом поплавка и стенками конусной трубки не достигнет такой величины, при которой действующие на поплавок силы уравниваются, и он останавливается на той или иной высоте, в зависимости от величины расхода. При неизменном расходе поплавок неподвижен.

В работающем ротаметре поплавок полностью погружен в измеряемую среду. Вес погруженного поплавка G_1 определяется уравнением:

$$G_1 = V_n g (\rho_n - \rho_c), \quad (4.13)$$

где V_n - объем поплавка; ρ_n и ρ_c - плотности материала поплавка и измеряемой среды соответственно; g - ускорение свободного падения.

Сила G_2 , действующая на поплавок со стороны измеряемого потока, равна

$$G_2 = (P_1 - P_2) F_o, \quad (4.14)$$

где P_1 и P_2 - давления среды перед поплавком и за ним; F_o - наибольшее поперечное сечение поплавка.

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

$$V_n g (\rho_n - \rho_c) = (P_1 - P_2) F_o \quad (4.15)$$

или

$$P_1 - P_2 = V_n g (\rho_n - \rho_c) / F_o. \quad (4.16)$$

Из полученного уравнения видно, что независимо от положения поплавка перепад давлений на нем постоянен и не зависит от измеряемого расхода. Это объясняется постоянством скорости измеряемой среды при изменении ее расхода, что обусловлено изменением площади кольцевого зазора между поплавком и трубкой. Уравнение для объемного расхода можно представить в виде:

$$Q = \alpha S_K \sqrt{\frac{2gV_n(\rho_n - \rho_c)}{\rho_c F_o}}. \quad (4.17)$$

где α - коэффициент расхода, учитывающий особенности потока; S_K - площадь кольцевого зазора между трубкой и боковой поверхностью поплавка.

Так как величины под корнем в уравнении (4.17) практически постоянны, то их можно заменить коэффициентом K , тогда

$$Q = \alpha S_K K,$$

т.е. эта зависимость линейна, поэтому шкала ротаметра равномерная.

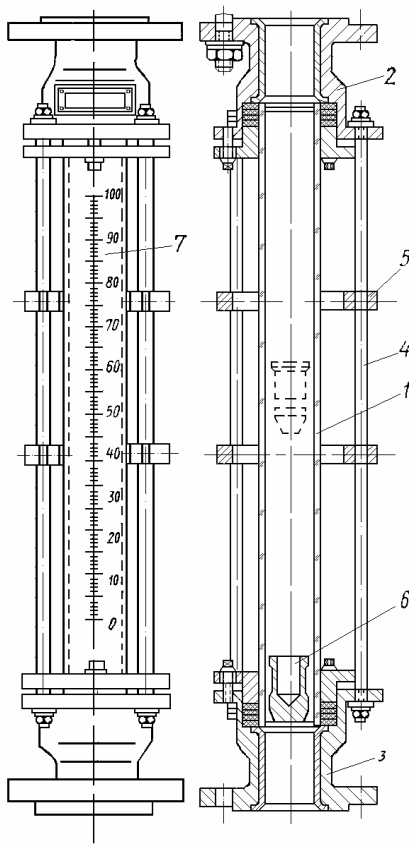


Рис.4.17. Стекланный ротаметр:

- 1 - полая коническая трубка;
- 2, 3 - металлические головки;
- 4 - тяги; 5- поперечины;
- 6 - поплавок; 7 - шкала

Ротаметры выполняют со стеклянной или металлической трубкой. На рис.4.17 показан ротаметр со стеклянной конической трубкой 1, закрепленной в двух металлических головках 2 и 3, снабженных сальниками и фланцами для включения в вертикальный участок трубопровода.

Головки стянуты одна с другой несколькими тягами 4, образующими вместе с поперечными 5 защитную решетку вокруг стеклянной трубки. Внутри трубки свободно перемещается поплавок 6, имеющий форму волчка. В нижней головке находится седло, на которое опускается поплавок при прекращении потока. Верхняя головка снабжена ограничителем хода поплавка. Седло и ограничитель хода не позволяют поплавку выйти за пределы стеклянной трубки. Шкала 7 прибора вытравлена на самой стеклянной трубке, отсчет ведут по верхней горизонтальной плоскости поплавка. В верхней

части поплавок часто делают косопроезы, которые позволяют поплавку вращаться вокруг вертикальной оси. При вращении поплавков центрируется внутри трубки, не соприкасаясь со стенками, его чувствительность повы-

шается. Ротаметры со стеклянной трубкой изготавливают на давление, не превышающее 600 КПа. При более высоком давлении измеряемой среды, а также для измерения расхода пара применяют ротаметры с металлической трубкой.

На рис.4.18 приведена принципиальная схема ротаметра с электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний на расстояние.

Измерительная часть прибора изготовлена в виде металлического цилиндра 1, в который помещена диафрагма 2. Внутри диафрагмы перемещается конусный поплавок 3, жестко соединенный со штоком 4, на верхнем конце штока укреплен сердечник 5 дифференциально - трансформаторного преобразователя. Сердечник находится внутри разделительной трубки 6, на которую надета катушка преобразователя. Бесшкальные ротаметры работают в комплекте с вторичными дифференциально - трансформаторными приборами.

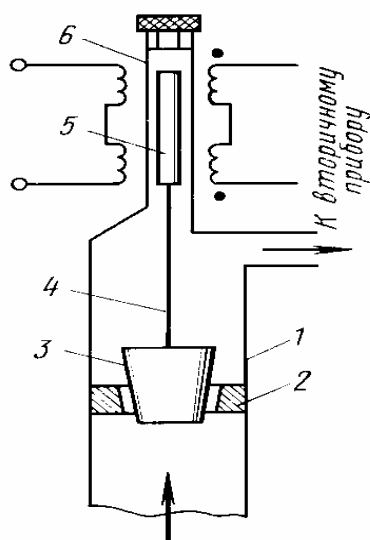


Рис.4.18. Ротаметр с электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний:

1 – цилиндр; 2 – диафрагма; 3 – поплавок;
4 – шток; 5 - сердечник; 6 – разделительная трубка

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

4.3.3. Электромагнитные расходомеры

Расходомеры данного типа относятся к бесконтактным, т.е. в них отсутствует прямой контакт измеряемой среды с узлами прибора. Эти расходомеры подразделяются на приборы с электромагнитным преобразователем расхода и приборы с электромагнитными преобразователями скорости потока.

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

Принципиальная схема электромагнитного расходомера показана на рис.4.19. Трубопровод 1 с перемещающейся в нем электропроводной жидкостью помещен в магнитное поле, создаваемое двумя катушками индуктивности (индукторами) 2. В стенки трубопровода диаметрально противоположно в одном поперечном сечении введены электроды 3 (заподлицо с внутренним диаметром трубы). К электродам подключают какой-либо высокочувствительный измерительный прибор 4, шкала которого градуирована в единицах скорости или единицах расхода.

Трубопровод изготавливают из изоляционного материала, для этой цели используют фторопласт, эбонит, резину и другие материалы в зависимости от свойств измеряемой жидкости.

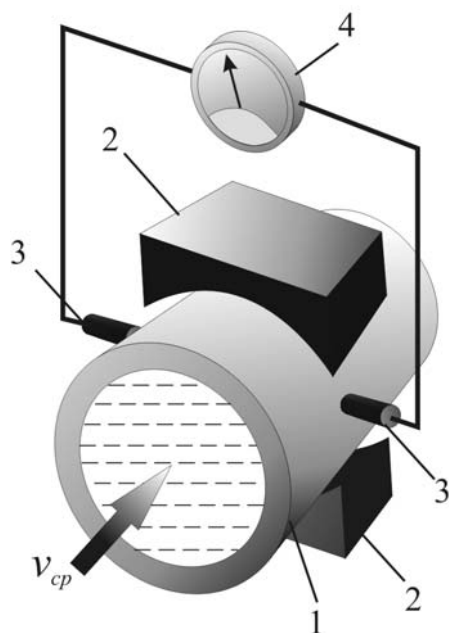


Рис. 4.19. Электромагнитный расходомер:
1 – трубопровод; 2 – катушки индуктивности;
3 – электроды; 4 – измерительный прибор

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

$$E = Blv, \quad (4.18)$$

где E - индуцируемая в проводнике ЭДС; B - магнитная индукция; l - длина проводника; v - скорость движения проводника.

В случае измерения расхода жидкости можно записать

$$E = BDv_{cp} . \quad (4.19)$$

где D - внутренний диаметр трубопровода; v_{cp} - средняя скорость протекания жидкости через поперечное сечение трубы в зоне индуцируемой ЭДС.

Выразив скорость через объемный расход Q , получим (для трубопровода круглого сечения)

$$E = \frac{4BQ}{\pi D} . \quad (4.20)$$

Из этой формулы следует, что при однородном магнитном поле ЭДС прямо пропорциональна объемному расходу.

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

Существенные и основные недостатки электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем: возникновение на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации затрудняют или делают невозможным правильное измерение ЭДС, индуцируемой магнитным полем в движущейся жидкости. Другим недостатком расходомеров с постоянным магнитным полем является трудность усиления напряжения постоянного тока. В связи с этим расходомеры с постоянным магнитным полем применяют лишь при измерении расхода жидких металлов, пульсирующих потоков жидкости и при кратковременных измерениях, когда поляризация не успевает оказать заметного влияния.

В настоящее время в подавляющем большинстве электромагнитных расходомеров применяют переменное магнитное поле. Если магнитное поле изменяется во времени t с частотой f , то для трубопроводов круглого сечения ЭДС равна

$$E = \frac{4Q}{\pi D} B_{\max} \sin \omega t , \quad (4.21)$$

где $B_{\max} = B/(\sin \omega t)$ – амплитудное значение магнитной индукции; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

При переменном магнитном поле электрохимические процессы оказывают меньшее влияние, чем при постоянном.

В современных электромагнитных расходомерах для усиления сигнала, снимаемого с преобразователя, используют электронный усилитель с

большим входным сопротивлением. При этом условии в большинстве случаев изменение сопротивления преобразователя при изменении параметров контролируемой среды не сказывается на показаниях. Это важное преимущество электромагнитных расходомеров.

В расходомерах с переменным магнитным полем возникают помехи, как в преобразователе, так и вне его. В основном на погрешность измерения влияют помехи: паразитные от внешних цепей; емкостные от переменного тока, питающего электромагнит; индукционные («трансформаторные») от магнитного поля преобразователя. Первые две помехи удастся устранить экранированием прибора.

Для исключения трансформаторной ЭДС используют различные способы. Один из способов заключается в применении двух индукционных преобразователей (с самостоятельными магнитами), включенных таким образом, что магнитные поля в них направлены в противоположные стороны. Дополнительные ЭДС взаимной индукции при этом (как равные по величине и по фазе, но противоположные по направлению) взаимно уничтожаются в первичной обмотке выходного трансформатора.

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

Электромагнитные расходомеры имеют ряд преимуществ. Прежде всего, они практически безынерционны, что очень важно при измерении быстроизменяющихся расходов и при использовании их в системах автоматического регулирования. Результат измерения не зависит от наличия взвешенных частиц в жидкости и пузырьков газа.

Измерения в достаточной степени независимы от профиля потока и таких свойств среды, как давление, температура, вязкость, плотность, состав, электропроводность и загрязнение электродов. В расходомере отсутствуют потери давления, отсутствуют движущиеся части.

Вследствие линейной зависимости возникающей ЭДС от расхода шкала вторичного прибора линейна. Электромагнитные расходомеры обеспечивают измерение расхода в интервале $0,002 - 300000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более при трубопроводах с внутренним диаметром от 3 до 3000 мм.

4.3.4. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковой (частота выше 20 КГц) метод измерения расхода основан на явлении смещения звукового колебания движущейся жидкой или газообразной средой. Измерение расхода, в основном, осуществляется путем косвенных измерений следующих величин:

- разности времен Δt (временной импульсный метод) прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него;
- разности фаз $\Delta \varphi$ (фазовый метод) между ультразвуковыми колебаниями, распространяющимися по потоку и против него;
- разности частот Δf (частотный метод) двух автогенераторов, в качестве элемента обратной связи которых используется контролируемая среда.

Современные расходомеры, как правило, реализуют временной импульсный метод. На рис.4.20 представлена принципиальная схема измерения расхода ультразвуковым расходомером, использующим временной импульсный метод.

Расходомер включает в себя два (рис.4.20, а) или четыре (рис.4.20, б) электроакустических приемопередающих преобразователя А (А') и В (В'), монтируемых с внешней стороны трубопровода. Преобразователи работают как в режиме источника ультразвукового сигнала, так и в режиме приемника. Расстояние между преобразователями равно L .

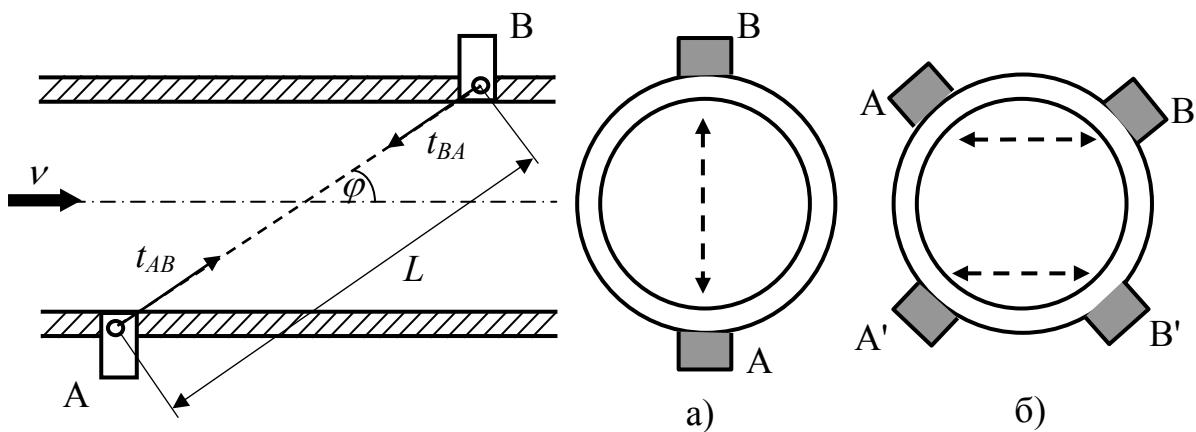


Рис.4.20. Схема измерения ультразвуковым расходомером:
а – с двумя преобразователями; б – с четырьмя преобразователями

Если ультразвуковые колебания распространяются по направлению скорости потока v , то они проходят расстояние L за время

$$t_{AB} = \frac{L}{(a+v)} = \frac{L}{a} \cdot \frac{1}{(1+v/a)} \quad (4.22)$$

где a - скорость звука в данной среде.

При распространении колебаний против скорости потока

$$t_{BA} = \frac{L}{(a-v)} = \frac{L}{a} \cdot \frac{1}{(1-v/a)}. \quad (4.23)$$

Отношение v/a весьма мало по сравнению с единицей (для жидкостей $a \approx 1000 \div 1500$ м/сек, $v \approx 3 \div 4$ м/сек), поэтому с большой степенью точности можно принять:

$$t_{AB} = \frac{L}{a} \left(1 - \frac{v}{a}\right) = \frac{L}{a} - \frac{Lv}{a^2}; \quad (4.24)$$

$$t_{BA} = \frac{L}{a} \left(1 + \frac{v}{a}\right) = \frac{L}{a} + \frac{Lv}{a^2}. \quad (4.25)$$

В ультразвуковых расходомерах фиксируется разность времени

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB}.$$

Из уравнений (4.24) и (4.25):

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB} = \frac{2Lv}{a^2}. \quad (4.26)$$

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

Ультразвуковые расходомеры предназначены для измерения расхода почти всех продуктов, будь то жидкости или газы, агрессивные или коррозионные. Единственным условием является отсутствие в потоке большого количества твердых и газовых включений.

Измерение не зависит от электропроводности, вязкости, температуры, плотности и давления среды. Полнопроходное сечение исключает накопление отложений, потери давления и износ.

4.3.5. Расходомеры Кориолиса

Расходомеры Кориолиса получили свое название по фамилии французского математика Густава Кориолиса. В 1835 г. Кориолис показал, что силу инерции следует учитывать при описании движения тел во вращающейся системе координат. Землю часто приводят в качестве примера силы, открытой Кориолисом. Поскольку Земля постоянно вращается, предмет, брошенный с Северного или Южного полюса по направлению к экватору, скорее всего, отклонится от намеченной траектории.

Основой расходомера является сенсор (рис. 4.21), который состоит из одной или двух измерительных (сенсорных) трубок I , имеющих изогну-

тую форму (на рис. 4.21 показаны сенсор с двумя U-образными трубками), которые приварены к участку трубопровода с фланцами. Между трубками на специальном креплении расположена задающая катушка 2, создающая колебания трубок. По бокам трубок на входе и выходе установлены детекторы 3, определяющие положение трубок друг относительно друга.

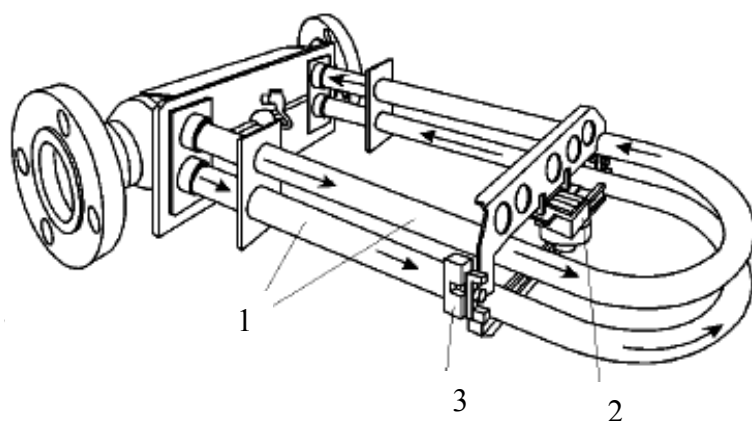


Рис. 4.21. Сенсор кориолисового расходомера:
1 – сенсорные трубки;
2 – задающая катушка;
3 – детекторы скорости

Измеряемая среда, поступающая в сенсор, разделяется на равные половины, протекающие через каждую из измерительных трубок.

Работа задающей катушки приводит к тому, что трубки колеблются вверх-вниз в противоположном направлении друг к другу (рис. 4.22). Колебания трубок подобны колебаниям камертона и имеют амплитуду менее 1 мм и частоту около 100 Гц.

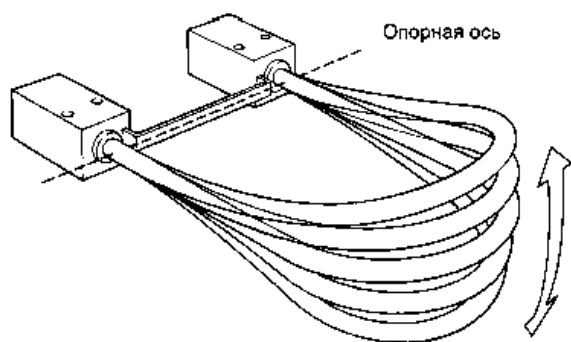


Рис. 4.22. Направление движения трубок

Сборки магнитов и катушек-соленоидов, называемых детекторами, установлены на измерительных трубках. Катушки смонтированы на одной трубке, магниты на другой. Каждая катушка движется сквозь однородное магнитное поле постоянного магнита. Сгенерированное напряжение от каждой катушки имеет форму синусоидальной волны. Эти сигналы представляют собой

движение одной трубки относительно другой.

Жидкости, протекающей через трубу, придается вертикальная составляющая движения вибрирующей трубки. При движении трубки вверх во время первой половины цикла колебания (рис.4.23) жидкость, втекающая в трубку создает сопротивление движению вверх давя на трубку вниз.

Поглотив вертикальный импульс при движении вокруг изгиба трубки, жидкость, вытекающая из нее, сопротивляется уменьшению вертикальной составляющей движения, толкая трубку вверх (рис.4.23). Это приводит к закручиванию трубки.

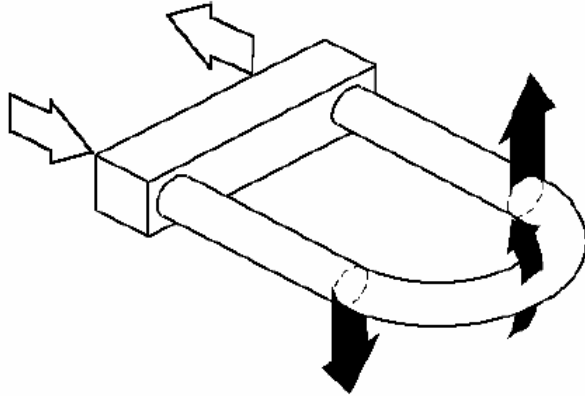


Рис. 4.23. Силы, действующие на трубку при движении вверх

Когда трубка движется вниз во время второй половины цикла колебания, она закручивается в противоположную сторону. В этом закручивании и проявляется эффект Кориолиса.

Исходя из второго закона Ньютона, угол закручивания трубки прямо пропорционален количеству жидкости, проходящей через трубку в единицу времени (рис.4.24).

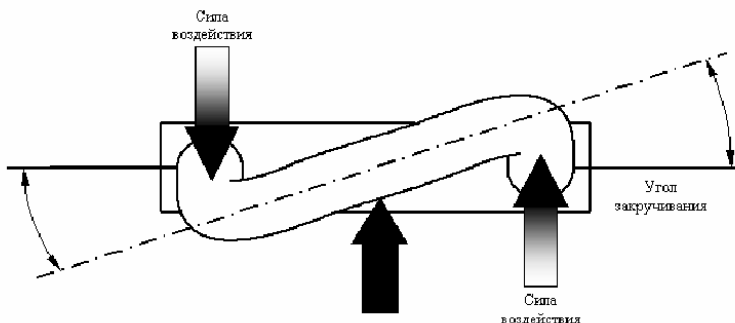


Рис. 4.24. Трубка сенсора и пара сил, приводящая ее к закручиванию

Детекторы измеряют фазовый сдвиг при движении противоположных сторон сенсорной трубки. Когда расход отсутствует, синусоидальные сигналы, поступающие с детекторов, находятся в одной фазе (рис. 4.25, а). При наличии расхода, как результат изгиба трубок генерируемые детекторами сигналы не совпадают по фазе (рис. 4.25,б), т.к. сигнал от входной стороны запаздывает по отношению к сигналу с выходной стороны. Разница во времени между сигналами (ΔT) измеряется в микросекундах и прямо пропорциональна массовому расходу. Чем больше ΔT , тем больше массовый расход.

Большинство расходомеров Кориолиса снабжены изогнутыми трубками, которые имеют разнообразную конструкцию. Однако, некоторые производители разработали счетчики Кориолиса с прямыми трубками. Расходомеры с прямыми трубками работают по тому же принципу, что и расходомеры, на которых установлены изогнутые трубки. В первой половине счетчика жидкость разгоняется под воздействием собственной инерции, а затем снижает скорость в его второй половине.

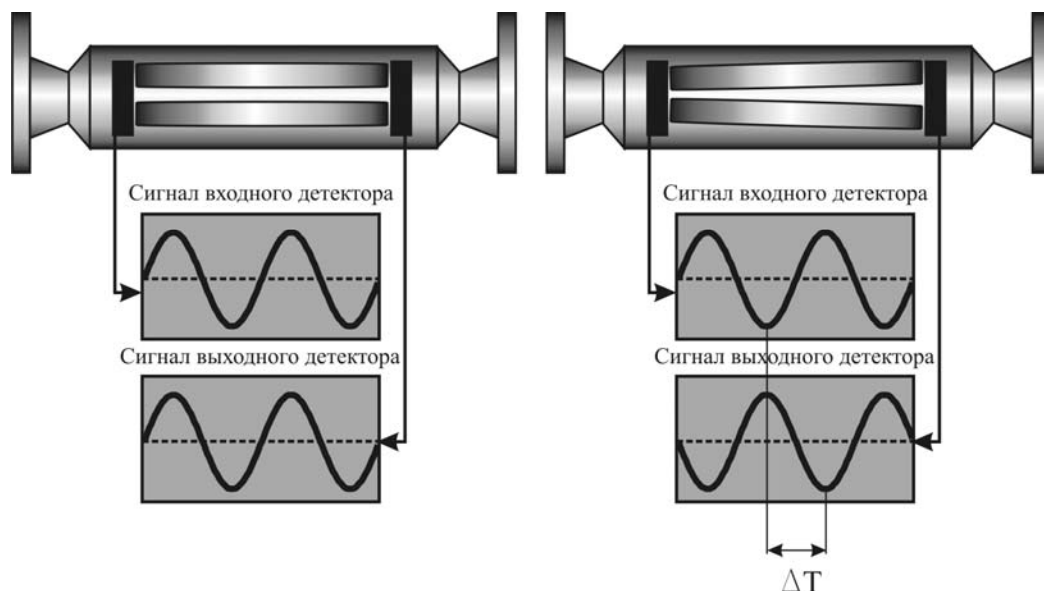


Рис.4.25.Сигналы, поступающие с детекторов:
а – при отсутствии расхода; б – при наличии расхода

Инерция жидкости создает силу Кориолиса, которая незначительно искривляет измерительную трубку. Степень искривления пропорциональна массовому расходу. Для определения степени искривления используются сенсоры. Температура трубки постоянно измеряется, поскольку ее колебательные свойства изменяются в зависимости от температурных изменений. Благодаря этому в измерения удастся внести любые требуемые поправки.

Расходомеры Кориолиса могут применяться для измерения расхода как жидкостей, так и газов с диаметром труб от 3 до 150 мм. Класс точности от 0,5 до 1,5.

4.3.6. Вихревые и вихреакустические расходомеры

Принцип действия этих расходомеров основан на явлении, носящем название «эффект Ван Кармана», согласно которому при обтекании неподвижного твердого тела потоком жидкости за телом образуется вихревая

дорожка, состоящая из вихрей, поочередно срывающихся с противоположных сторон тела. На рис.4.26 показано обтекание цилиндра потоком и образование вихрей.

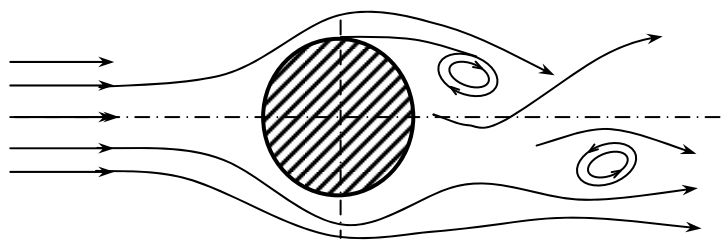


Рис.4.26. Образование вихрей

разование вихрей.

Частота образования вихрей за телом пропорциональна скорости потока. Детектирование вихрей и определение частоты их образования позволяет определить скорость и объемный расход среды.

В зависимости от способа детектирования частоты вихрей различают вихревые и вихреакустические расходомеры.

В **вихревых** расходомерах определение частоты вихреобразования производится при помощи двух пьезодатчиков, фиксирующих пульсации давления в зоне вихреобразования ("съем сигнала по пульсациям давления").

Конструктивно датчик представляет собой моноблок, состоящий из корпуса проточной части и электронного блока. В корпусе проточной части датчика размещены первичные преобразователи объемного расхода, избыточного давления и температуры (рис.4.27).

Электронный блок представляет собой плату цифровой обработки сигналов первичных преобразователей, заключенную в корпус. На входе в проточную часть датчика установлено тело обтекания 1.

За телом обтекания, по направлению потока газа, симметрично расположены два пьезоэлектрических преобразователя пульсаций давления 2. При протекании потока газа (пара) через проточную часть датчика за телом обтекания образуется вихревая дорожка, частота следования вихрей в которой с высокой точностью пропорциональна скорости потока, а, следовательно, и расходу. В свою очередь, вихреобразование приводит к появлению за телом обтекания пульсаций давления среды. Частота пульсаций давления идентична частоте вихреобразования и, в данном случае, служит мерой расхода. Пульсации давления воспринимаются пьезоэлектрическими преобразователями, сигналы с которых в форме электрических колебаний поступают на плату цифровой обработки, где происходит вычисление объемного расхода и объема газа при рабочих условиях и формирование выходных сигналов по данным параметрам в виде цифрового кода.

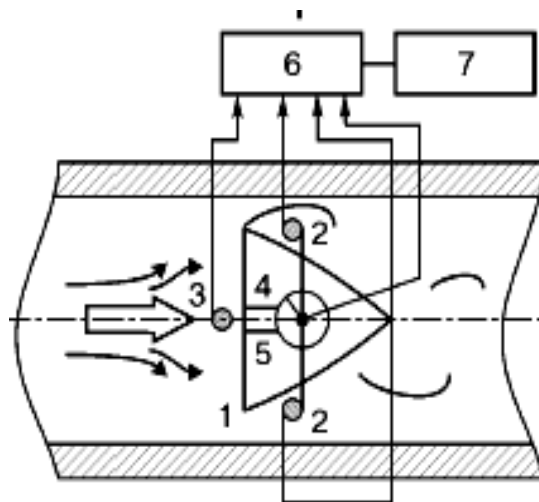


Рис.4.27. Вихревой расходомер:

1 – тело обтекания; 2 – преобразователь пульсаций давления; 3 – преобразователь избыточного давления; 4 – термопреобразователь; 5 – отверстия; 6 – плата цифровой обработки; 7 – вычислитель.

Преобразователь избыточного давления 3 тензорезистивного принципа действия размещен перед телом обтекания вблизи места его крепления. Он осуществляет преобразование значения избыточного давления потока в трубопроводе в электрический сигнал, который с выхода мостовой схемы преобразователя поступает на плату цифровой обработки. Термопреобразователь сопротивления платиновый (ТСП) 4 размещен внутри тела обтекания. Для обеспечения непосредственного контакта ТСП со средой в теле обтекания выполнены отверстия 5. Электрический сигнал термопреобразователя также подвергается цифровой обработке.

Плата цифровой обработки 6, содержащая два микропроцессора, производит обработку сигналов преобразователей пульсаций давления, избыточного давления и температуры, в ходе которой обеспечивается фильтрация паразитных составляющих, обусловленных влиянием вибрации, флуктуаций давления и температуры потока, и происходит формирование выходных сигналов многопараметрического датчика по расходу, объему при рабочих условиях, давлению и температуре в виде цифрового кода. Выходные сигналы передаются на вычислитель 7.

В **вихреакустических** расходомерах (рис.4.28) в качестве тела обтекания применяется призма трапецеидального сечения, а детектирование вихрей производится с помощью ультразвуковых преобразователей.

Расходомер состоит из проточной части и электронного блока. В корпусе проточной части расположены тело обтекания – призма трапецеи-

дальной формы 1, пьезоизлучатели (ПИ) 2, пьезоприемники (ПП) 3 и термодатчик 7.

Электронный блок включает в себя генератор 4, фазовый детектор 5, микропроцессорный фильтр с блоком формирования выходных сигналов 6. Тело обтекания расположено на входе жидкости в проточную часть. При обтекании этого тела потоком жидкости за ним образуется вихревая дорожка, частота следования вихрей в которой с высокой точностью пропорциональна расходу.

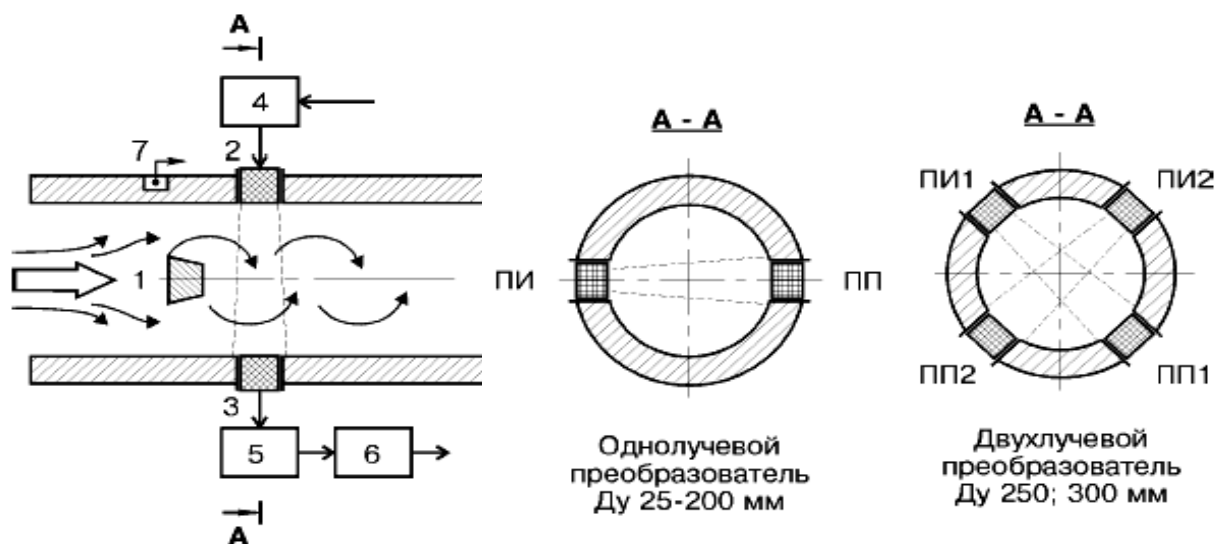


Рис.4.28. Вихреакустический расходомер:

1 – тело обтекания; 2 – пьезоизлучатель; 3 – пьезоприемник; 4 – генератор; 5 – фазовый детектор; 6 – микропроцессорный блок; 7 – термодатчик

За телом обтекания в корпусе проточной части расположены диаметрально противоположно друг другу стаканчики, в которых собраны ультразвуковой пьезоизлучатель ПИ и пьезоприемник ПП. На ПИ от генератора подается переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. Пройдя через поток, эти колебания в результате взаимодействия с вихрями оказываются модулированными по фазе. На ПП ультразвуковые колебания преобразуются в электрические и подаются на фазовый детектор. На фазовом детекторе определяется разность фаз между сигналами с ПП и опорного генератора. На выходе фазового детектора образуется напряжение, которое по частоте и амплитуде соответствует интенсивности и частоте следования вихрей, которая в силу пропорциональности скорости потока является мерой расхода.

Вихреакустические расходомеры применяются в чистых жидкостях с низкой вязкостью без завихрений, которые движутся со средней или высо-

кой скоростью. В потоке не должно быть завихрений, поскольку они могут повлиять на точность измерений. Любая эрозия, коррозия или отложения, которые могут изменить форму плохо обтекаемого тела могут повлиять на калибровку расходомера, и поэтому идеальные условия предусматривают чистые жидкости.

4.3.7. Калориметрические расходомеры

Принцип действия калориметрических расходомеров основан на нагреве потока жидкости или газа посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и расхода теплоты в нагревателе. Если пренебречь теплом, отдаваемым потоком через стенки трубопровода в окружающую среду, то уравнение теплового баланса между расходом тепла, потребляемым нагревателем, и теплом, сообщенным потоку, принимает вид

$$q_t = k Q_m c_p \Delta t, \quad (4.27)$$

где k – поправочный множитель на неравномерность распределения температур по сечению трубопровода; c_p – теплоемкость (для газа при постоянном давлении) при температуре $t = (t_1 + t_2)/2$; Δt – разность температур до и после нагревателя.

Тепло к потоку в калориметрических расходомерах подводится обычно электронагревателями, для которых

$$q_t = 0,24 I^2 R, \quad (4.28)$$

где I – сила тока; R – сопротивление нагревателя.

На основании выражений (4.27) и (4.28) получим уравнение массового расхода

$$Q_m = \frac{0,24 I^2 R}{k c_p \Delta t} \quad (4.29)$$

Возможны и существуют два способа измерения массового расхода в соответствии с выражением (4.29):

- расход определяют по значению мощности, потребляемой нагревателем и обеспечивающей постоянную разность температур Δt ;
- расход определяют по разности температур Δt при неизменной мощности, подводимой к нагревателю.

В первом случае расходомеры работают как регуляторы температуры нагрева потока, у которых измерительным и регулирующим элементом

является уравновешенный мост с термометрами сопротивления до и после нагревателя. При изменении разности температур мост выходит из равновесия и включает устройство, которое изменяет регулировочное сопротивление до тех пор, пока не восстановится заданная степень нагрева. Массовый расход при этом определяют по показаниям ваттметра, включенного в цепь нагревателя.

Датчики калориметрических расходомеров второго типа (рис. 4.25) состоят из двух последовательно соединенных термометров сопротивления 1 и 2, устанавливаемых до и после нагревателя 3. Последовательное соединение термометров обеспечивает равенство токов в их цепях, что позволяет градуировать их непосредственно по разности температур. Кроме термометров сопротивления используют также термисторы и термопары. Термометры сопротивления обладают тем преимуществом, что их можно выполнять в виде равномерной сетки, перекрывающей все сечения потока, и таким образом измерять среднюю по сечению температуру. Термометры сопротивления включают в плечи моста, два плеча которого составляют резисторы сопротивлением R_1 и R_2

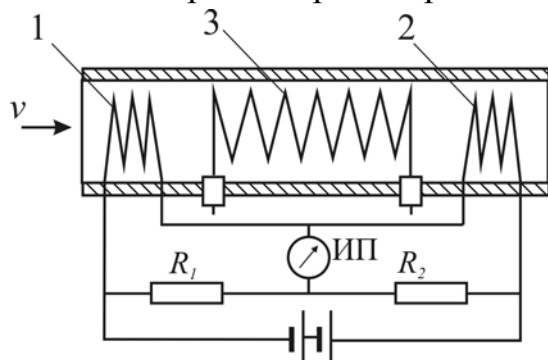


Рис. 4.25. Калориметрический расходомер:

1 и 2 – термометры сопротивления;
3 – электрический нагреватель

Калориметрические расходомеры обладают достаточно высокой точностью, оцениваемой (в условиях индивидуальной градуировки) приведенной погрешностью $\pm (0,5 - 1,0)\%$, большим диапазоном измерений (10:1 и выше), малой инерционностью.

Недостатками их являются сложность измерительных схем и нестабильность характеристик, связанная с коррозией приемных устройств и осаждением на них различных частиц, переносимых потоком.

Данные приборы можно применять для измерения массового расхода как жидкостей, так и газов, но в настоящее время ими измеряют, главным образом, малые (в трубках диаметром 2-3 мм) и средние расходы чистых газов.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются счетчики по принципу действия?
2. Назовите основные характеристики счетчиков.
3. На чем основан принцип действия объемных счетчиков?
4. Чем определяется количество жидкости, прошедшей через скоростной счетчик?
5. Чем отличаются барабанный и ротационный газовые счетчики?
6. Где применяются насосы-дозаторы?
7. Какие сужающие устройства относятся к стандартным?
8. По какой зависимости определяется объемный расход по методу переменного перепада давления?
9. Что учитывает коэффициент расхода в методе переменного перепада давления?
10. Какое из стандартных сужающих устройств дает больший перепад давления при одном и том же расходе?
11. Линейна ли зависимость разности давления до и после диафрагмы от измеряемого расхода?
12. Где наблюдается минимальное давление при измерении расхода методом переменного перепада давления?
13. Что входит в комплект расходомера переменного перепада давления?
14. Будет ли работать ротаметр, если в нем конусную трубку заменить цилиндрической?
15. Почему перепад давления не зависит от положения поплавка ротаметра и постоянен?
16. Линейна ли зависимость положения поплавка ротаметра от измеряемого расхода?
17. Назовите преимущества измерения расхода бесконтактными методами перед контактными.
18. Почему электромагнитным расходомером нельзя измерять расход неэлектропроводной жидкости?
19. Назовите основные недостатки электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем.

20. Может ли ультразвуковой расходомер измерить расход неэлектропроводной жидкости?
21. Что является мерой расхода в ультразвуковом расходомере?
22. На каком законе основана работа расходомеров Кориолиса?
23. Что входит в комплект расходомера Кориолиса?
24. Что является мерой расхода в кориолисовом расходомере?
25. На каком принципе основана работа вихреакустического расходомера?
26. Назовите область применения вихреакустических расходомеров.
27. Назовите основные отличия вихревых от вихреакустических расходомеров.
28. Назовите области применения калориметрических расходомеров.
29. От каких переменных зависит массовый расход в калориметрическом расходомере?

5. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

5.1. Основные понятия

В настоящее время операция измерения уровня является ключевой для организации контроля и управления технологическими процессами в химическом, нефтехимическом и нефтеперерабатывающем производствах, в пищевой промышленности, промышленности строительных материалов, в системах экологического мониторинга и во многих других отраслях. К приборам для измерения уровня заполнения ёмкостей и сосудов, или **уровнемерам**, предъявляются различные требования: в одних случаях требуется только сигнализировать о достижении определённого предельного значения, в других необходимо проводить непрерывное измерение уровня заполнения.

5.2. Классификация приборов для измерения уровня

Существует широкая номенклатура средств контроля и измерения уровня, использующих различные физические методы: поплавковый, буйковый, ёмкостный, гидростатического давления, ультразвуковой, радарный и др. Эти методы и средства позволяют контролировать уровень различных сред: жидких (чистых, загрязнённых), пульп, нефтепродуктов, сыпучих твёрдых различной дисперсности. При выборе уровнемера необходимо учитывать такие физические и химические свойства контролируемой среды, как температура, абразивные свойства, вязкость, электрическая проводимость, химическая агрессивность и т.д. Кроме того, следует принимать во внимание рабочие условия в резервуаре или около него: давление, вакуум, нагревание, охлаждение, способ заполнения или опорожнения (пневматический или механический), наличие мешалки, огнеопасность, взрывоопасность и другие.

Устройства для измерения уровня жидкостей можно подразделить на следующие:

- *визуальные*;
- *поплавковые*, в которых для измерения уровня используется поплавок или другое тело, находящееся на поверхности жидкости;
- *буйковые*, в которых для измерения уровня используется массивное тело (буйёк), частично погружаемое в жидкость;
- *гидростатические*, основанные на измерении гидростатического давления столба жидкости;

- *электрические*, в которых величины электрических параметров зависят от уровня жидкости;
- *ультразвуковые*, основанные на принципе отражения от поверхности звуковых волн;
- *радарные и волноводные*, основанные на принципе отражения от поверхности сигнала высокой частоты (СВЧ);
- *радиоизотопные*, основанные на использовании интенсивности потока ядерных излучений, зависящих от уровня жидкости.

Помимо классификации уровнемеров по принципу действия, эти приборы делятся на:

- приборы для непрерывного слежения за уровнем;
- приборы для сигнализации о предельных значениях уровня (сигнализаторы уровня).

5.3. Уровнемеры непрерывного действия

5.3.1. Визуальные уровнемеры

Простейшим измерителем уровня жидкости служат указательные стекла (рис. 5.1). Работа указательных стекол основана на принципе сообщающихся сосудов. Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избы-

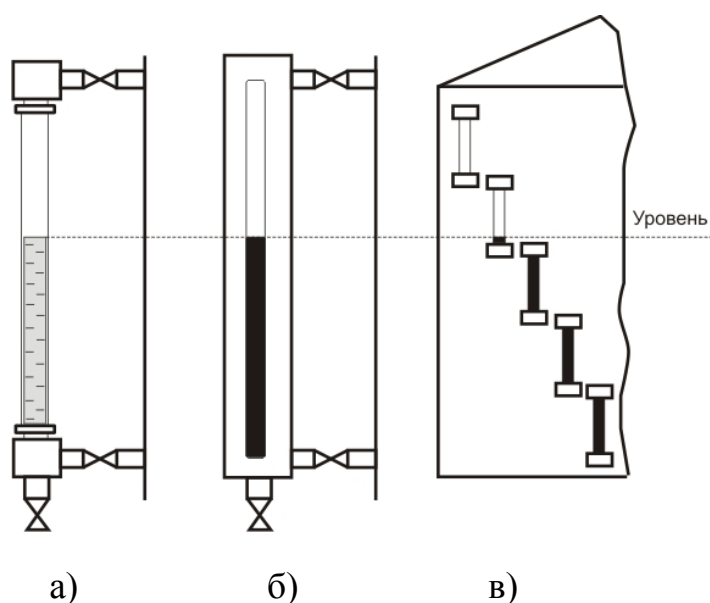


Рис.5.1 Указательные стёкла:

- а - проходящего света;
- б - отраженного света;
- в - составного типа

точным давлением или разрежением). Наблюдая за положением уровня жидкости в стеклянной трубке, можно судить об изменении уровня в сосуде. Указательные стёкла снабжают вентилями или кранами для отключения их от сосуда и продувки системы.

В арматуру указательных стекол сосудов, работающих под давлением, обычно вводят предохранительные устройства, автоматически закрываю-

щие каналы в головках при случайной поломке стекла.

Существуют указательные стекла проходящего (рис.5.1,а) и отраженного света (рис.5.1,б). Плоские указательные стекла рассчитаны на давление до 2,94 МПа и температуру до 300 °С.

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

5.3.2. Поплавковые уровнемеры

Среди существующих разновидностей уровнемеров поплавковые являются наиболее простыми. Получили распространение поплавковые уровнемеры узкого и широкого диапазонов. Поплавковые уровнемеры узкого диапазона (рис. 5.2, а) обычно представляют собой устройства, содержащие шарообразный поплавок диаметром 80 - 100 мм, выполненный из нержавеющей стали. Поплавок плавает на поверхности жидкости и через штангу и специальное сальниковое уплотнение соединяется либо со стрелкой измерительного прибора, либо с преобразователем Π угловых перемещений в унифицированный электрический или пневматический сигналы.

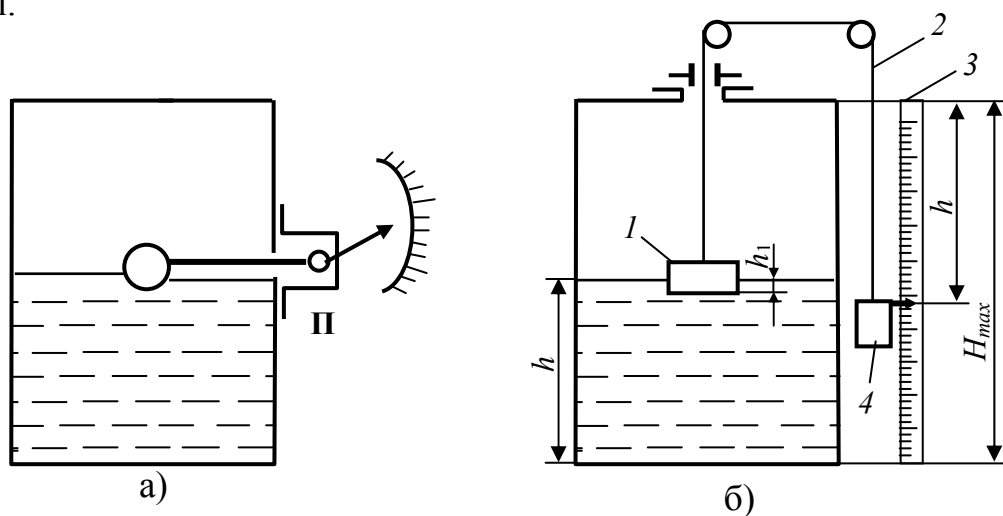


Рис. 5.2. Поплавковые уровнемеры:

а – узкого диапазона; б – широкого диапазона;

1 – поплавок; 2 – гибкий трос; 3 – шкала; 4 – противовес

Поплавковые уровнемеры широкого диапазона (рис.5.2, б) представляют собой поплавок 1, связанный с противовесом 4 гибким тросом 2. В нижней части противовеса укреплена стрелка, указывающая по шкале 3 значения уровня жидкости в резервуаре. При расчетах поплавковых уров-

немеров подбирают такие конструктивные параметры поплавка, которые обеспечивают состояние равновесия системы «поплавок — противовес» только при определенной глубине погружения поплавка. Если пренебречь силой тяжести троса и трением в роликах, состояние равновесия системы «поплавок — противовес» описывается уравнением:

$$G_{\Gamma} = G_{\Pi} + Sh_1\rho_{ж}g, \quad (5.1)$$

где G_{Γ}, G_{Π} - силы тяжести противовеса и поплавка; S - площадь поплавка; h_1 - глубина погружения поплавка; $\rho_{ж}$ - плотность жидкости.

Повышение уровня жидкости изменяет глубину погружения поплавка и на него действует дополнительная выталкивающая сила. В результате равенство (5.1) нарушается и противовес опускается вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавка не станет равной h_1 . При понижении уровня действующая на поплавок выталкивающая сила уменьшается и поплавок начинает опускаться вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавка не станет равной h_1 .

5.3.3. Буйковые уровнемеры

В основу работы буйковых уровнемеров положено физическое явление, описываемое законом Архимеда. Он гласит, что на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила F , пропорциональная весу вытесненной им жидкости. Чувствительным элементом в этих уровнемерах является цилиндрических боек, изготовленный из материала с плотностью, большей плотности жидкости. Зачастую боек выполнен в виде трубы из нержавеющей стали длиной $H_б$, запаянной с обеих сторон, к одному из концов которой приделан крючок. Боек находится в вертикальном положении и частично погружен в жидкость. Длина буйка $H_б$ подбирается приближенной к максимальному измеряемому уровню в аппарате.

При изменении уровня жидкости в аппарате согласно закону Архимеда вес буйка в жидкости изменяется пропорционально изменению уровня. Выталкивающая сила, действующая на боек, равна:

$$F = \rho g V_{ж} = \rho g Sh, \quad (5.2)$$

где ρ - плотность измеряемой жидкости; g - ускорение свободного падения; $V_{ж}$ - объем вытесненной буйком жидкости; S - площадь поперечного сечения буйка; h - длина буйка, погруженного в жидкость.

Измерительная схема буйкового уровнемера приведена на рис. 5.3. Уровнемер работает следующим образом. Когда уровень жидкости в аппа-

рате равен или меньше начального h_0 (величина h_0 называется зоной нечувствительности уровнемера), измерительная штанга 2, на которую подвешен буюк 1, находится в равновесии, так как момент M_1 создаваемый весом буйка G_1 , уравнивается моментом M_2 , создаваемым противовесом 4.

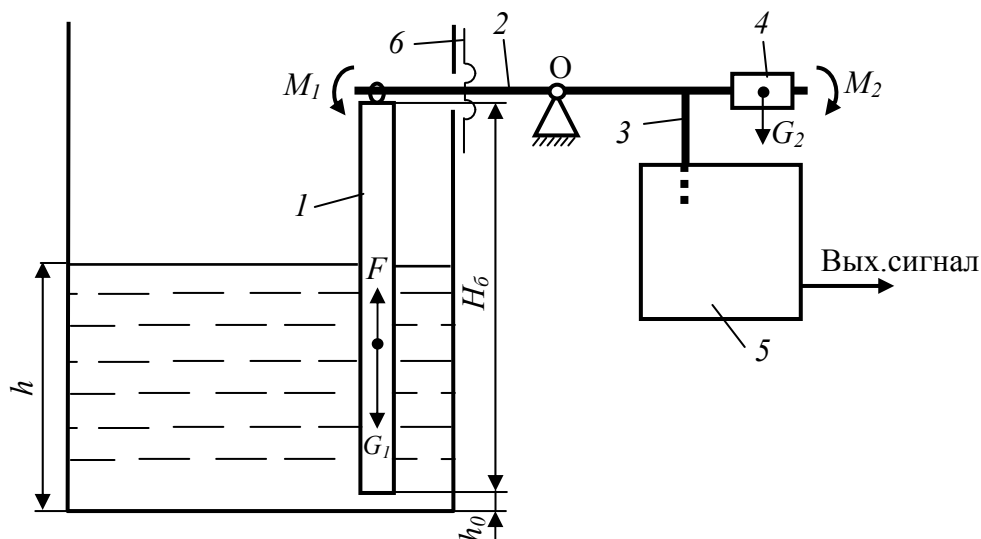


Рис.5.3. Измерительная схема буйкового уровнемера:
1 – буюк; 2 – штанга; 3 – рычаг; 4 – противовес;
5 – преобразователь; 6 – уплотнительная мембрана

Когда уровень жидкости становится больше h_0 (например, h), часть буйка длиной $(h - h_0)$ погружается в жидкость, поэтому вес буйка уменьшается на величину

$$F = \rho g S (h - h_0), \quad (5.3)$$

а следовательно, уменьшается и момент M_1 , создаваемый буйком на штанге 2. Так как M_2 становится больше M_1 , штанга поворачивается вокруг точки **О** по часовой стрелке на небольшой угол и перемещает рычаг 3 преобразователя 5. Преобразователь (электрический или пневматический) формирует выходной сигнал, который является выходным сигналом уровнемера. Движение измерительной системы преобразователя происходит до тех пор, пока сумма моментов всех сил, действующих на рычаг 2, не станет равной нулю.

Герметизация технологического аппарата при установке в нем чувствительного элемента достигается уплотнительной мембраной 6. При необходимости буюк может быть установлен в выносной камере, располагаемой вне технологического аппарата.

Минимальный верхний предел измерений буйковых уровнемеров - 0,025 м, максимальный - 16 м. Значение верхнего предела измерений приборов должно выбираться из ряда: 250; 400; 600; 1000; 1600; 2500; 4000; 6000; 8000; 10000 мм, хотя по согласованию с заказчиком длина буйка может быть выполнена индивидуально.

5.3.4. Гидростатические уровнемеры

Данный метод измерения уровня основан на определении гидростатического давления, оказываемого жидкостью на дно резервуара. Величина гидростатического давления на дно резервуара P_r зависит от высоты столба жидкости над измерительным прибором h и от плотности жидкости ρ , т.е. $P_r = \rho gh$, соответственно $h = P_r / \rho g$, где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ (это справедливо только для неподвижных жидкостей).

Измерение гидростатического давления может осуществляться:

- датчиком избыточного давления (манометром), подключаемым на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня;
- дифференциальным манометром, подключаемым к резервуару на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня, и к газовому пространству над жидкостью;
- измерением давления газа (воздуха), прокачиваемого по трубке, опущенной в заполняющую резервуар жидкость на фиксированное расстояние (пьезометрический метод).

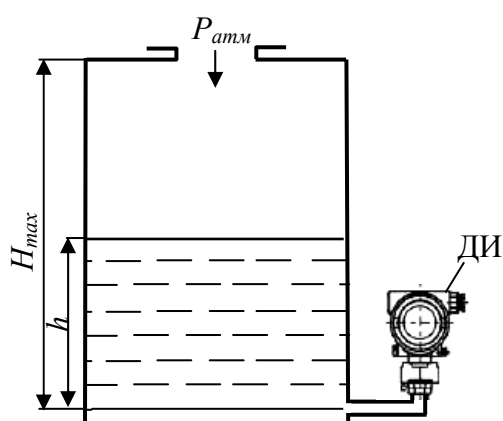


Рис.5.4. Измерение уровня в резервуаре при помощи датчика избыточного давления

На рис. 5.4 приведена схема измерения уровня датчиком избыточного давления (манометром). Применяемый для этих целей датчик ДИ может быть любого типа с соответствующими пределами измерений, определяемыми зависимостью $P_r = \rho gh$.

При измерении уровня данным способом имеют место погрешности измерения, определяемые классом точности измерительного прибора, изменениями плотности жидкости, а также колебаниями атмосферного

давления. Если сосуд находится под избыточным давлением, данная измерительная схема непригодна, т.к. к гидростатическому давлению прибавляется избыточное давление над поверхностью жидкости, не учитываемое данной измерительной схемой.

Более широкое применение получили схемы измерения уровня с использованием дифференциальных датчиков давления (дифманометров). Эти схемы используются для измерения уровня жидкости в технологических аппаратах, находящихся под избыточным давлением. С помощью

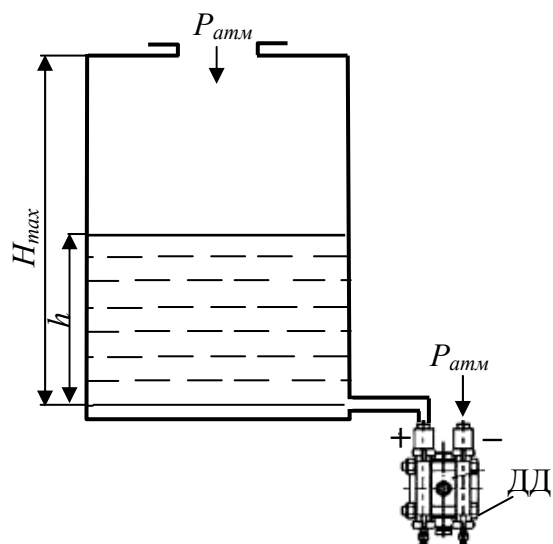


Рис.5.5. Измерение уровня в открытом резервуаре при помощи датчика дифференциального давления

дифференциальных датчиков давления возможно также измерение уровня жидкости в открытых резервуарах, уровня раздела жидкостей.

Измерение уровня в открытых резервуарах, находящихся под атмосферным давлением, осуществляется по схеме, представленной на рис. 5.5.

Дифманометр ДД через импульсную трубку плюсовой камеры соединен с резервуаром в его нижней точке. При этом минусовая камера должна сообщаться с атмосферой. В этом случае устраняется погрешность, связанная с колебаниями атмосферного давления, т.к. результирующий перепад давления на дифманометре равен:

$$\Delta P = (P_{\Gamma} + P_{атм}) - P_{атм} = P_{\Gamma}.$$

Данная измерительная схема используется, если дифманометр расположен на одном уровне с нижней плоскостью резервуара. В случае, если дифманометр оказывается ниже него на высоту h_1 , целесообразно использование **уравнительных сосудов (УС)**. Схемы измерения с уравнительным сосудом для резервуаров, находящихся под атмосферным давлением представлены на рис. 5.6.

Уравнительный сосуд применяется для компенсации статического давления, создаваемого столбом жидкости h_1 в импульсной трубке.

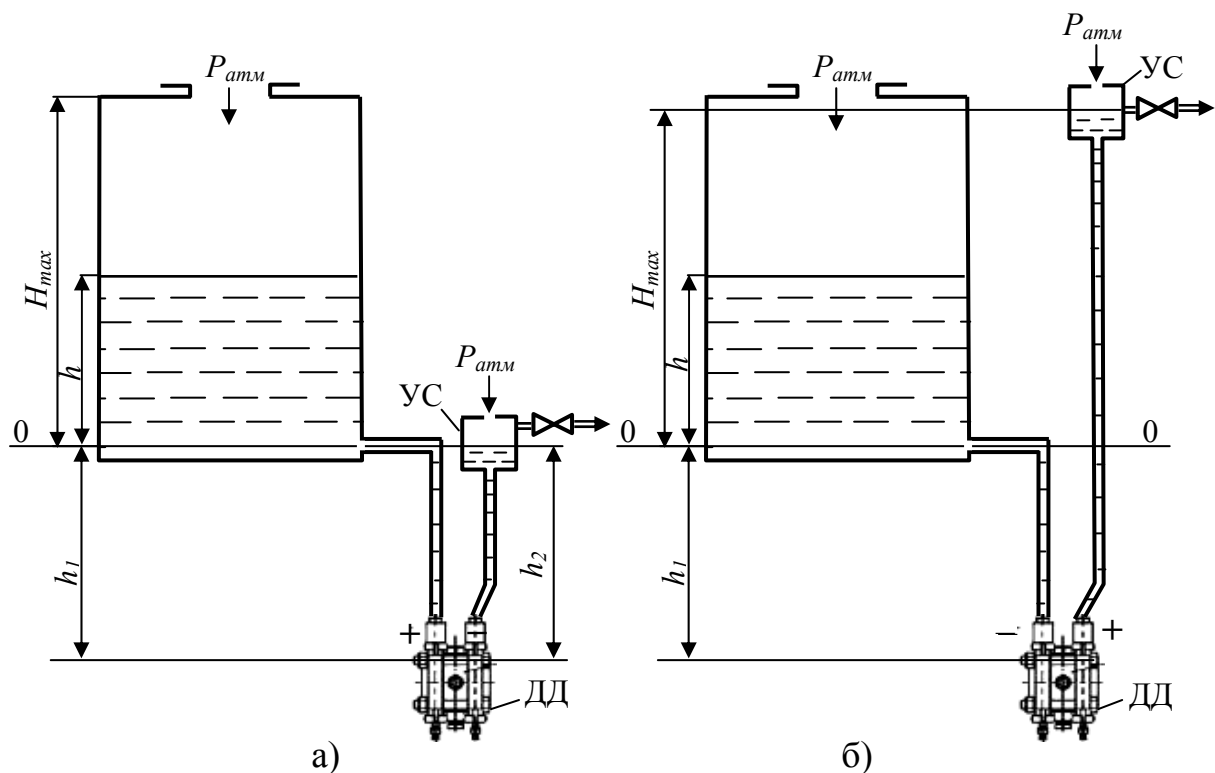


Рис.5.6. Измерение уровня в открытом резервуаре при помощи датчика дифференциального давления с использованием уравнительного сосуда:
а – с нижним расположением уравнительного сосуда;
б – с верхним расположением уравнительного сосуда

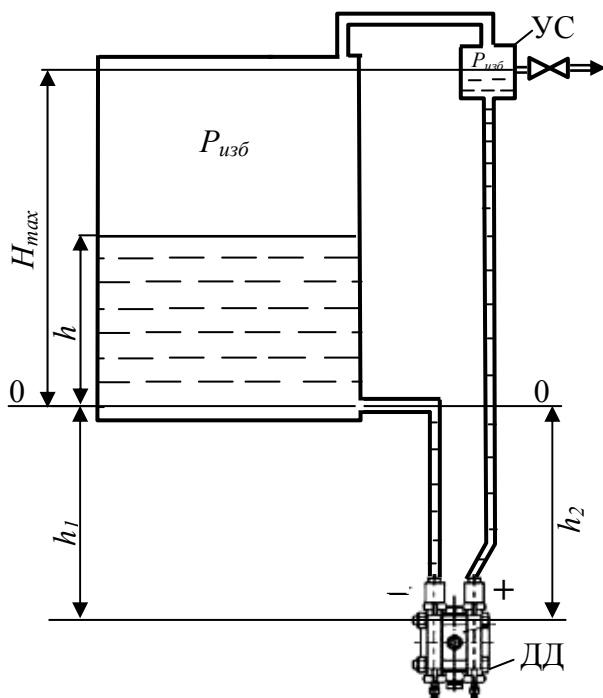


Рис.5.7. Измерение уровня в закрытом резервуаре при помощи датчика дифференциального давления с использованием уравнительного сосуда.

При измерении уровня в аппаратах, находящихся под избыточным давлением $P_{изб}$, применяют схему, приведенную на рис. 5.7. $P_{изб}$ поступает в обе импульсные трубки дифманометра, поэтому измеряемый перепад давления ΔP можно представить в виде:

$$\Delta P = \rho g H_{max} - \rho g h. \quad (5.5)$$

При $h = 0$ $\max \Delta P = \Delta P_{max}$, а при $h = H_{max}$, $\Delta P = 0$. Как следует из уравнения, шкала измерительного прибора уровнемера будет обращенной.



Рис.5.8. Датчик гидростатического давления

В последнее время широкое распространение получили датчики гидростатического давления ДГ (рис. 5.8). У них, как и у дифманометров, имеются две измерительные камеры, одна из которых выполнена в виде открытой мембраны, а вторая в виде штуцера. Данный уровнемер всегда закрепляется непосредственно у дна резервуара, поэтому не имеет импульсных трубок, а значит, отсутствует необходимость в компенсации высоты импульсной трубки h_1 . Возможные измерительные схемы с использованием гидростатического датчика давления представлены на рис.5.9. Схему, представленную на рис. 5.9, в, целесообразно использовать для процессов, где невозможно избежать обильного образования и накопления конденсата в трубе, соединяющей датчик с объемом над жидкостью.

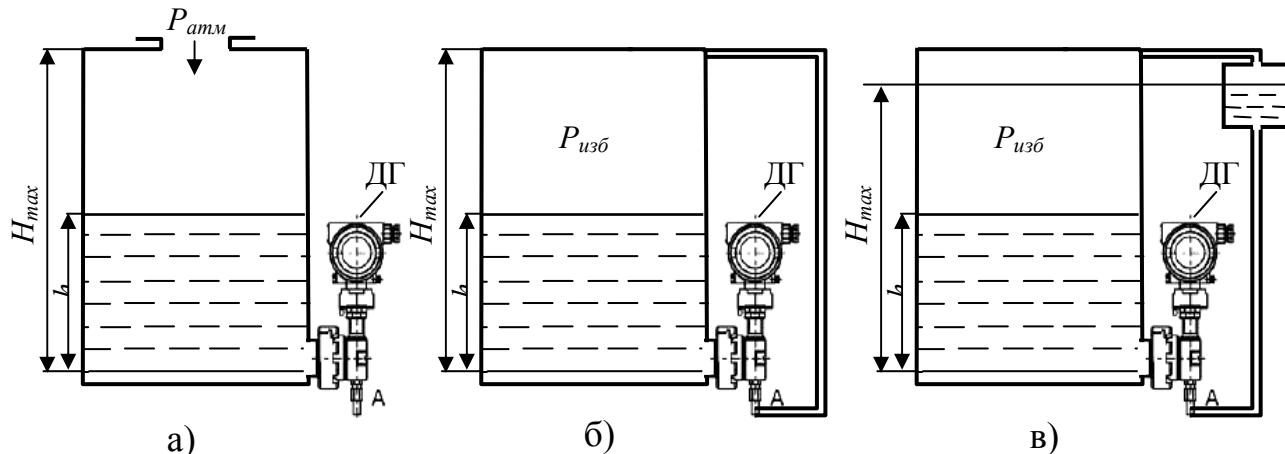


Рис.5.9. Измерение уровня в резервуарах при помощи датчика гидростатического давления:

- а – для открытых резервуаров;
- б – для закрытых резервуаров без уравнительного сосуда;
- в – для закрытых резервуаров с уравнительным сосудом

Уровнемеры, в которых измерение гидростатического давления осуществляется путем измерения давления газа, прокачиваемого по трубке, погруженной на фиксированную глубину в жидкость, заполняющую ре-

зервуар, называют **пьезометрическими**. Схема пьезометрического уровнемера приведена на рис. 5.10.

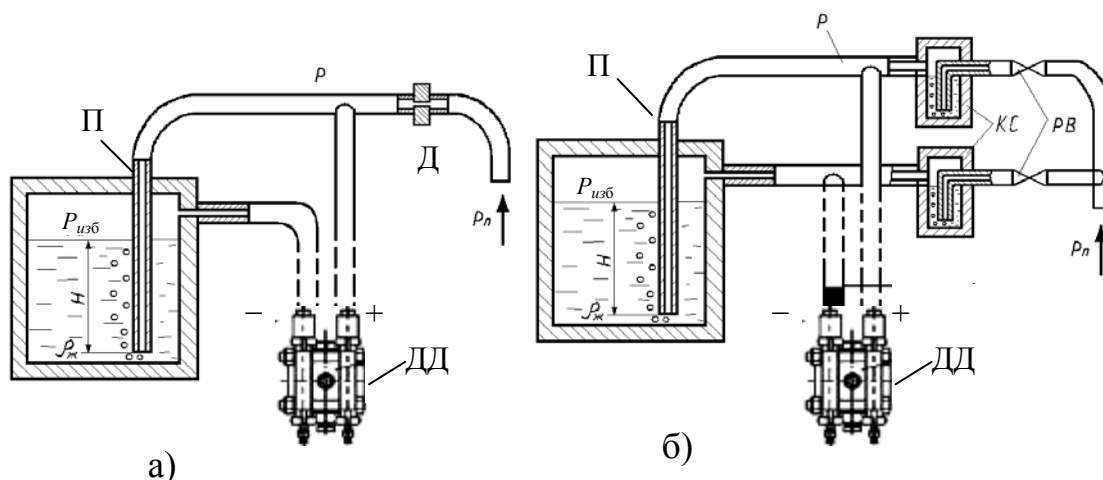


Рис. 5.10. Пьезометрический уровнемер:
 а – стандартная схема измерения;
 б – схема измерения для агрессивных жидкостей

Принцип их работы основан на принципе гидравлического затвора. Пьезометрическая трубка **П** размещается в аппарате, в котором измеряется уровень. Для измерения уровня используют воздух или инертный газ под давлением P_n , который продувают через слой жидкости. Газ поступает в трубку через дроссель **Д**, служащий для ограничения расхода. Давление P газа после дросселя измеряется дифманометром **ДД**.

При подаче газа давление в пьезометрической трубке постепенно повышается до тех пор, пока не станет равным давлению столба жидкости высотой H плюс давление над жидкостью $P_{изб}$ (если имеется). Когда давление в трубке станет равным сумме этих давлений, из нижнего открытого конца трубки начинает выходить газ. Расход подбирают такой, чтобы газ покидал трубку в виде отдельных пузырьков (примерно один пузырек в секунду).

Уровень жидкости определяется по установившемуся давлению ($P - P_{изб}$) в системе:

$$P - P_{изб} = H \rho_{ж} g,$$

где $P_{изб}$ – избыточное давление в аппарате (в частном случае $P_{изб} = P_{атм}$).

Отсюда

$$H = \frac{P - P_{изб}}{\rho_{ж} g}. \quad (5.6)$$

В случае измерения уровня в сосудах, заполненных агрессивными жидкостями и газами (рис.5.10, б) обязателен непрерывный подвод воздуха или инертного газа в обе линии, подсоединяемые к дифференциальному манометру. Для наблюдения за непрерывностью на каждой линии устанавливают стеклянные контрольные сосуды КС с водяным затвором, по которому видно движение воздуха, или ротаметры. Количество подводимого воздуха устанавливают регулирующими вентилями РВ.

5.3.5. Электрические уровнемеры

В электрических уровнемерах уровень жидкости преобразуется в какой-либо электрический сигнал. Наиболее распространены емкостные и омические уровнемеры.

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

Принципиальная схема емкостного уровнемера показана на рис.5.11.

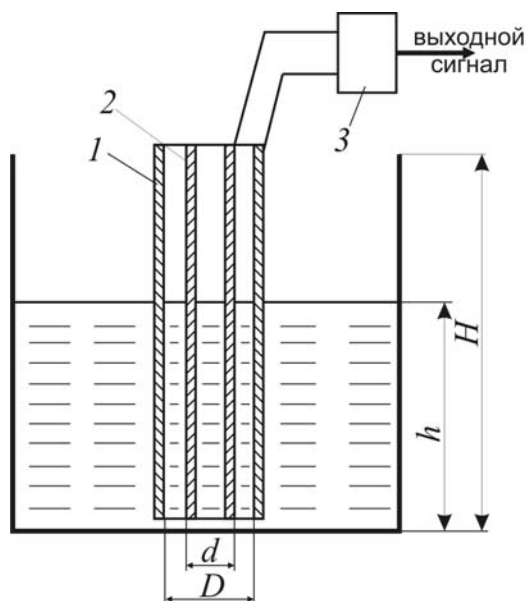


Рис.5.11. Емкостный уровнемер:

1, 2 - электроды;

3-электронный блок

В сосуд с жидкостью, уровень которой необходимо измерить, опущен преобразователь, представляющий собой электрический конденсатор, емкость которого зависит от уровня жидкости. Преобразователи выполняют цилиндрического и пластинчатого типов, а также в виде жесткого стержня. Цилиндрический емкостной преобразователь выполнен из двух или нескольких концентрично расположенных труб, между которыми находится слой жидкости высотой h . Емкость преобразователя равна сумме емкостей двух участков - погруженного в жидкость с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ж}$ и находящегося в среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ср}$ (для воздуха $\epsilon_{ср}=1$).

Емкость цилиндрического емкостного преобразователя равна:

$$C = C_h + C_{H-h} = 0.24 \frac{\epsilon_{ж} h + \epsilon_{ср} (H - h)}{\lg(D / d)},$$

где D и d - наружный и внутренний диаметр труб преобразователя, H - высота емкости; h - измеряемый уровень.

При измерении уровня агрессивных, но неэлектропроводных жидкостей обкладки преобразователя выполняют из химически стойких сплавов или покрывают тонкой антикоррозионной пленкой, диэлектрические свойства которой учитывают при расчете. Покрытие обкладок тонкими пленками применяют также при измерении уровня электропроводных жидкостей.

Омические уровнемеры используют главным образом для сигнализации и поддержания в заданных пределах уровня электропроводных жидкостей. Принцип их действия основан на замыкании электрической цепи источника питания через контролируемую среду, представляющую собой участок электрической цепи с определенным омическим сопротивлением. Прибор представляет собой электромагнитное реле, включаемое в цепь между электродом и контролируемым материалом. Схемы включения релевого сигнализатора уровня могут быть различны в зависимости от типа объекта и числа контролируемых уровней. На рис. 5.12, а показана схема включения прибора в токопроводящий объект. В этом случае для контроля одного уровня h можно использовать один электрод, одно реле и один провод. При контроле двух уровней h_1 и h_2 (рис. 5.12, б) их требуется уже по два.

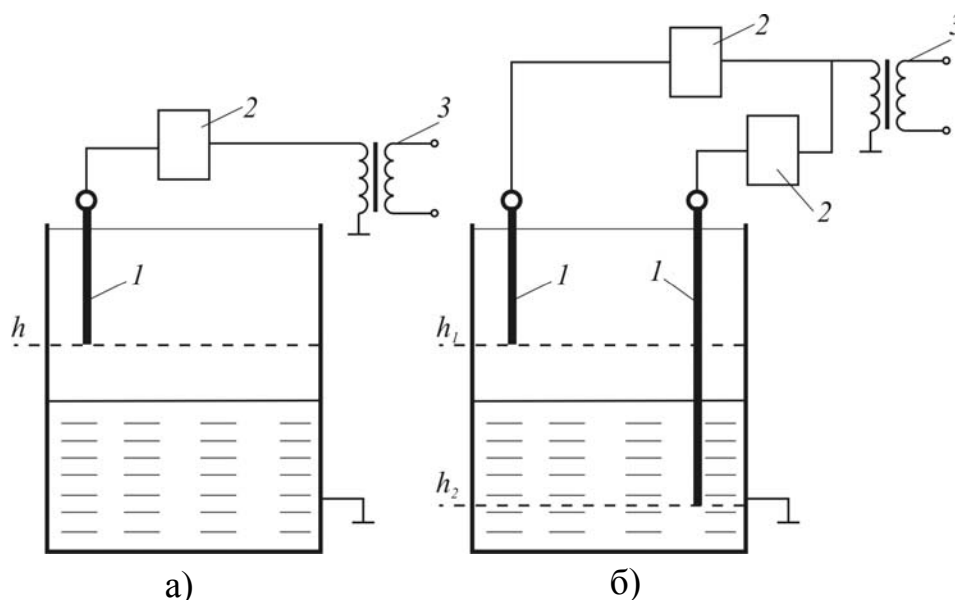


Рис. 5.12. Омические сигнализаторы уровня:

а - одного уровня; б - двух уровней.

1 - электрод; 2 - электромагнитное реле; 3 - источник питания

В качестве электродов применяют металлические стержни или трубы и угольные электроды (агрессивные жидкости).

Основной недостаток всех электродных приборов – невозможность их применения в средах вязких, кристаллизующихся, образующих твердые осадки и налипающих на электроды преобразователей.

5.3.6. Радиоизотопные уровнемеры

Уровнемеры с радиоизотопными излучателями делятся на две группы:

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

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

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

Преобразователь на фланцах 4 присоединен к вертикальным трубкам 2, установленным внутри объекта измерения. Расположенный в герметичном корпусе преобразователя реверсивный двигатель 6 через червячную передачу 7 вращает барабан 8, на котором укреплен стальной лентой 3. На концах ленты свободно висят источник излучения 1 и приемник излучения 13. Электрический сигнал от приемника излучения через гибкий кабель 11 передается на электронный блок. При перемещении приемника кабель фиксируется в определенном положении при помощи ролика 14 с грузом. Лента 3 проходит через зубчатый ролик 9, на оси которого расположен первичный сельсин 10.

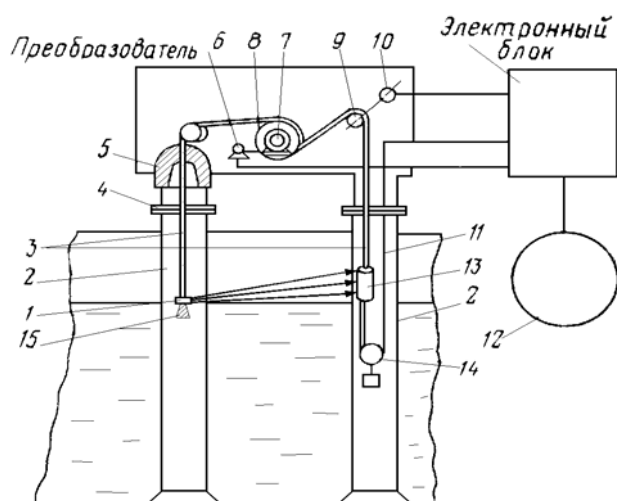


Рис.5.13. Радиоизотопный уровнемер:

1-источник излучения; 2-трубки; 3-стальная лента; 4-фланцы; 5-свинцовый контейнер; 6-реверсивный двигатель; 7-червячная передача; 8-барабан; 9-зубчатый ролик; 10-первичный сельсин; 11-гибкий кабель; 12-показывающий прибор; 13-приемник излучения; 14-ролик с грузом; 15-свинцовая пробка

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

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

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

5.3.7. Ультразвуковые уровнемеры

Ультразвуковые уровнемеры (частота выше 20 КГц) позволяют измерять уровень в отсутствие контакта с измеряемой средой и в труднодоступных местах. В ультразвуковых уровнемерах обычно используется принцип отражения звуковых волн от границы раздела «жидкость - газ (воздух)». На рис.5.14 показана измерительная схема ультразвукового уровнемера, работающего на отражении звука от границы раздела двух сред.

Прибор состоит из электронного блока (ЭБ), пьезоэлектрического излучателя (преобразователя) и вторичного прибора. Электронный блок состоит из генератора 1, задающего частоту повторения импульсов, генератора импульсов 2, посылаемых в измеряемую среду, приемного усилителя 4 и измерителя времени 5.

Генератор 1 управляет работой генератора 2 и схемой измерения времени. Генератор 2 формирует короткие импульсы для возбуждения пьезоэлектрического излучателя 3. Электрический импульс, преобразованный в ультразвуковой в пьезоэлектрическом излучателе, распространяется в газовой среде, отражается от границы раздела «жидкость – воздух», возвращается обратно, воздействуя спустя некоторое время на тот же излучатель,

и преобразуется в электрический сигнал. Оба импульса: посланный и отраженный, разделенные во времени, поступают на усилитель 4.

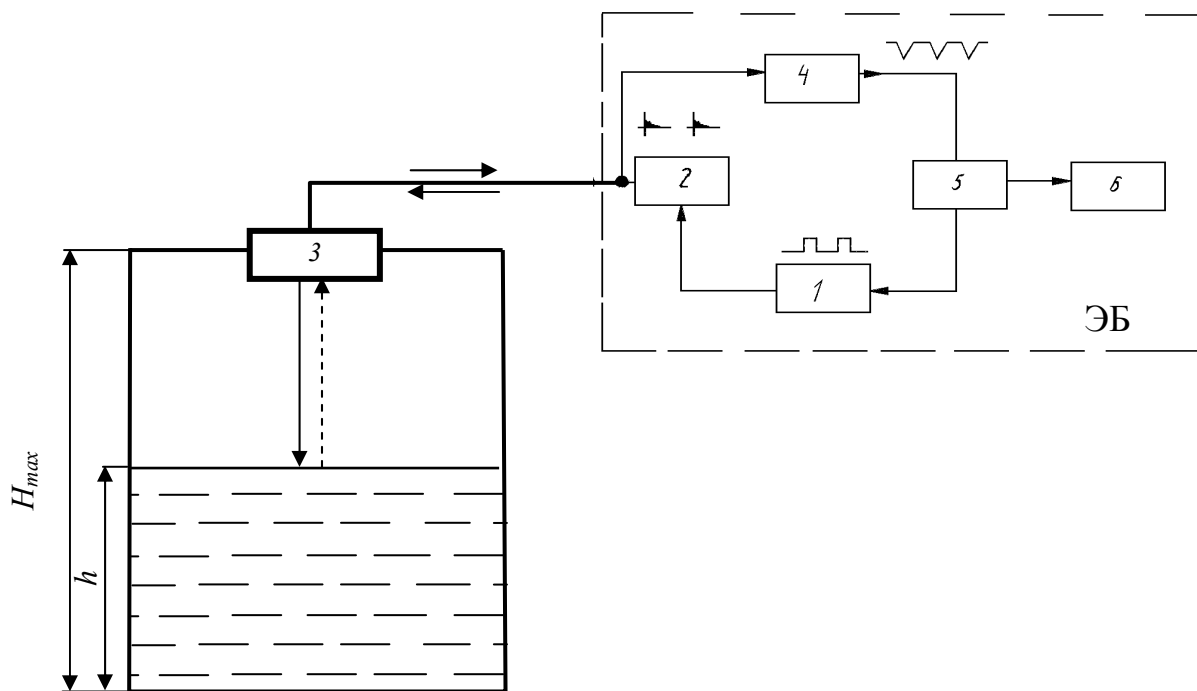


Рис.5.14. Измерительная схема ультразвукового уровнемера:

- 1 – задающий генератор; 2 – генератор импульсов;
- 3 – пьезоэлектрический излучатель; 4 – усилитель;
- 5 – измеритель времени; 6 – вторичный прибор

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

$$\tau = 2(H_{max} - h) / c , \quad (5.7)$$

где H_{max} – максимальный измеряемый уровень; h – текущий уровень; c – скорость распространения ультразвука в измеряемой среде.

Постоянное напряжение, пропорциональное времени запаздывания отраженного сигнала (уровню), получаемое в измерителе времени, подается на вторичный прибор 6.

Химические и физические свойства среды не влияют на результат измерения, полученный ультразвуковым методом, поэтому без проблем может измеряться уровень агрессивных, абразивных, вязких и клейких веществ. Однако необходимо помнить, что на скорость распространения ультразвука оказывает влияние температура воздуха в среде его распространения. Кроме того, будучи сильно зависимой от температуры, скорость ультразвука зависит от давления воздуха: она увеличивается с ростом давления. Связанные с изменениями давления в нормальной атмосфере

ре относительные изменения скорости звука составляют приблизительно 5%. Скорость ультразвука также зависит от состава воздуха, например, от процентного содержания CO_2 и влажности. Влияние относительной влажности на скорость ультразвука является меньшим по сравнению с влиянием, оказываемым температурой и давлением: дополнительная разница скорости в сухом и насыщенном влагой воздухе составляет около 2%.

Основные достоинства метода:

- бесконтактный;
- применим для загрязнённых жидкостей;
- реализация метода не предъявляет высоких требований к износостойкости и прочности оборудования;
- независимость от плотности контролируемой среды.

Недостатки:

- большое расхождение конуса излучения;
- отражения от нестационарных препятствий (например, мешалок) могут вызвать ошибки измерения;
- применим только в резервуарах с нормальным атмосферным давлением;
- на сигнал оказывают влияние пыль, пар, газовые смеси и пена.

5.3.8. Радарные уровнемеры

Существует множество самых различных методов контроля уровня, позволяющих получать информацию как о предельных его значениях, так и о текущем значении. Гораздо меньшее число методов реализовано в промышленных системах. Некоторые из реализованных методов являются уникальными, и случаи их применения можно пересчитать по пальцам одной руки, другие – гораздо более универсальны и потому широко используются в серийных системах. Но есть и методы, удачно сочетающие в себе и уникальность, и универсальность. В первую очередь, к ним можно отнести микроволновый бесконтактный метод, в просторечии небезосновательно именуемый **радарным**. Этот метод, с одной стороны, обеспечивает минимальный контакт измерительного устройства с контролируемой средой, а с другой стороны – практически полностью нечувствителен к изменению её температуры и давления. Причем и температура, и давление могут иметь значения, недопустимые для применения других методов, в первую очередь, контактных. Безусловно, уникальность возможностей не может не сказываться на цене приборов. Но прогресс в этой области настоль-

ко велик, а преимущества метода столь очевидны, что можно достаточно уверенно прогнозировать очень широкое распространение радарных систем контроля уровня уже в самом недалеком будущем.

При всех существующих различиях общим остается принцип действия: излученный СВЧ - сигнал отражается от контролируемого объекта, принимается обратно и соответствующим образом обрабатывается (рис.

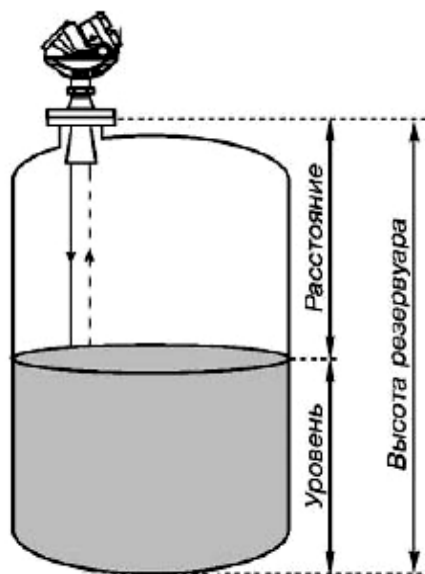


Рис. 5.15. Схема измерения уровня радарным уровнемером

5.15). Результатом обработки является значение того или иного параметра объекта: дальность, скорость, направление движения и т.д. Вне зависимости от используемого принципа в радарных уровнемерах применяются СВЧ - сигналы с несущей частотой, лежащей в диапазоне от 5,8 до 26 ГГц.

В настоящее время в радарных системах контроля уровня применяются преимущественно две технологии: с **непрерывным частотно - модулированным излучением** (FMCW – frequency modulated con-

tinuous wave) и **импульсным излучением сигнала**.

Технология FMCW реализует косвенный метод измерения расстояния. Уровеньмер излучает микроволновый сигнал, частота которого изменяется непрерывно по линейному закону между двумя значениями f_0 и f_1 (рис. 5.16). Отраженный от поверхности контролируемой среды (жидкость, сыпучий материал) сигнал принимается той же антенной и обрабатывается. Его частота сравнивается с частотой сигнала, излучаемого в данный момент времени. Значение разности частот (Δf) прямо пропорционально расстоянию до поверхности (l).

Принцип очень прост, но на пути его практической реализации существует множество технических и технологических проблем. Одной из важнейших, непосредственно влияющих на точность измерения, является обеспечение высокой линейности изменения частоты сигнала и особенно ее температурной стабильности, поскольку уровнемеры, как правило, предназначены для эксплуатации в очень широком температурном диапазоне.

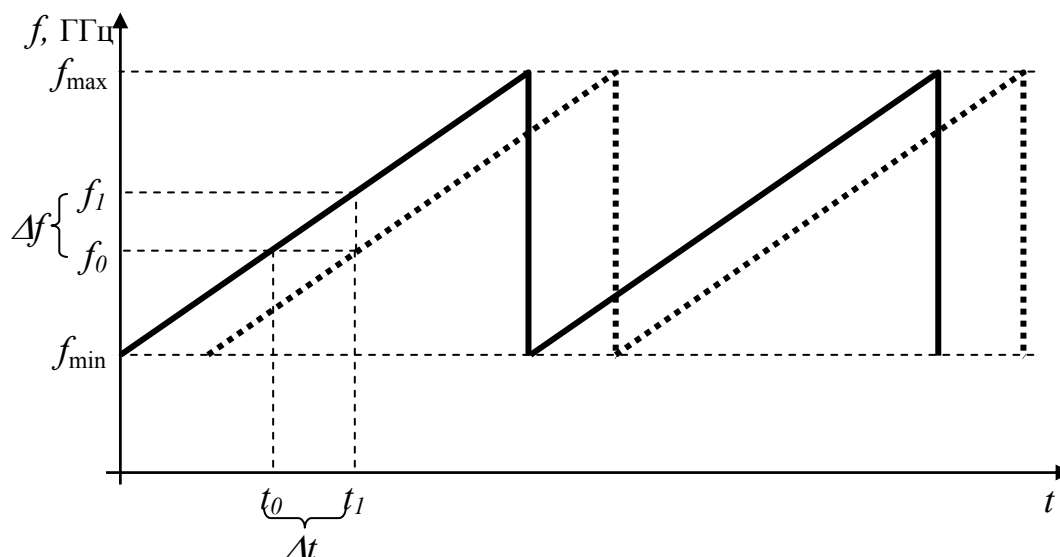


Рис. 5.16. Принцип измерения расстояния при использовании технологии FMCW:

— излученный сигнал;
 отраженный сигнал

Идеальными для уровнемера FMCW являются условия, когда поверхность контролируемой среды имеет достаточно большую площадь, на ней отсутствуют какие-либо возмущения, а сам резервуар полностью свободен от каких-либо внутренних конструктивных элементов. Однако реальные условия разительно отличаются от идеальных и приносят дополнительные проблемы, связанные с образованием большого числа паразитных

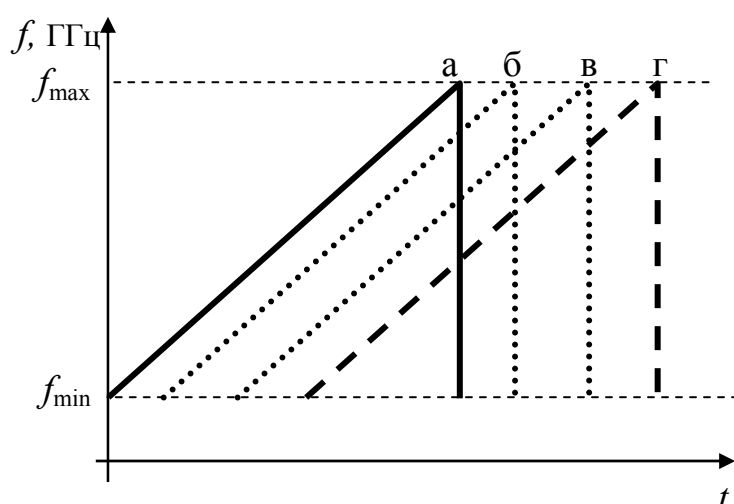


Рис. 5.17. Паразитные отражения при использовании технологии FMCW:

а – излученный сигнал; б, в – паразитные эхо-сигналы; г – полезный отраженный сигнал

ных эхо-сигналов от элементов конструкции, неровностей поверхности (особенно при контроле сыпучих материалов) и т.п. (рис. 5.17).

Кроме того, приём и передача сигнала осуществляются одновременно. В результате на входе приёмника уровнемера присутствует сложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде. Для выде-

ления частот эхо-сигналов применяется алгоритм, основанный на методе быстрого преобразования Фурье. Для его реализации требуются значительные вычислительные ресурсы и относительно продолжительное время. Выделять полезный эхо-сигнал и игнорировать остальные позволяет специальное программное обеспечение, установленное на сервисном компьютере или встроенное в уровнемер.

В радарх **импульсного** типа используется метод определения расстояния, основанный на непосредственном измерении времени прохождения СВЧ - импульса от излучателя до контролируемой поверхности и обратно. В результате для отраженного сигнала применение процедуры быстрого преобразования Фурье не требуется. Однако время прохождения сигналом дистанции в несколько метров составляет всего единицы наносекунд. Поэтому для обеспечения измерения столь малых значений с требуемой точностью все-таки требуется применение специальных методов обработки сигнала. Для этого обычно используется преобразование СВЧ - сигнала в сигнал промежуточной частоты ультразвукового диапазона. После такого преобразования к обработке сигналов радарного уровнемера могут быть легко применимы методы и алгоритмы, используемые в ультразвуковых приборах контроля уровня. Радарные уровнемеры импульсного типа обладают рядом преимуществ перед устройствами, использующими технологию FMCW. Во-первых, принимаемые эхо-сигналы вне зависимости от природы их источника разнесены во времени, что обеспечивает их более простое разделение. Во-вторых, среднее энергопотребление импульсных уровнемеров составляет единицы мкВт (пиковая мощность при излучении СВЧ-импульса составляет около 1 мВт), что позволяет использовать для их подключения двухпроводную схему с питанием от измерительной цепи со стандартным токовым сигналом 4-20 мА; в приборах, работающих по технологии FMCW, энергопотребление существенно выше из-за непрерывного характера излучения, а также постоянно выполняемой математической обработки эхо-сигнала. И, в-третьих, в импульсных уровнемерах электроника для выполнения первичной обработки сигнала проще, а сама обработка выполняется исключительно аппаратными средствами; в результате благодаря меньшему числу комплектующих надёжность прибора получается потенциально выше.

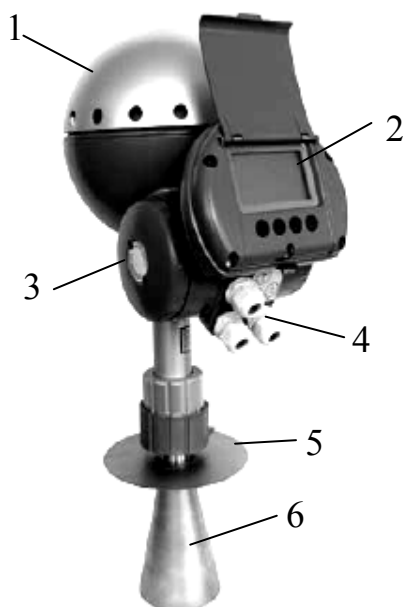


Рис. 5.18. Конструкция радарного уровнемера:

- 1 – электронный блок; 2 – дисплей;
 3 – распределительная коробка;
 4 – кабельные вводы; 5 – крепежное приспособление; 6 – антенна

Конструкция одного из типов радарного уровнемера представлена на рис. 5.18. Одним из самых важных элементов радарного уровнемера является его антенная система. Именно от антенны зависит, какая часть излучённого сигнала достигнет поверхности контролируемого материала и какая часть отражённого сигнала будет принята и передана на вход электронного блока для последующей обработки. В радарных системах контроля уровня преимущественно используются антенны пяти типов: рупорная; стержневая; трубчатая; параболическая; планарная.

Стержневая и рупорная антенны (рис. 5.19, а,б) наиболее широко используются в составе приборов, предназначенных для контроля уровня в технологических установках. Трубчатые антенны (рис. 5.19, в) применяются в тех случаях, когда выполнение измерения посредством рупорной или стержневой антенны связано с очень большими трудностями или просто невозможно, например, при наличии пены, сильного испарения или высокой турбулентности контролируемой жидкости.

Параболические и планарные антенны (рис. 5.19, г,д) используются исключительно в составе систем коммерческого учета нефтепродуктов.

При контроле уровня в закрытых емкостях, а это наиболее частое применение радарных уровнемеров, антенна, находясь внутри резервуара, подвергается воздействию всех неблагоприятных факторов, которые там только могут присутствовать.

К ним относятся и высокое давление, и высокая температура, и агрессивные испарения, и пыль, и т.д. Безусловно, конструкция антенны и материалы, используемые для ее изготовления, должны всему этому успешно противостоять. Кроме того, конструкция самих резервуаров отличается огромным разнообразием и потому способна создать массу проблем при установке уровнемера.



Рис. 5.19. Типы антенн радарных уровнемеров:
а – стержневая; б – рупорная; в – трубчатая;
г – параболическая; д – планарная

5.3.9. Волноводные уровнемеры

Данный тип уровнемеров относится к уровнемерам контактного типа. Принцип действия волноводного уровнемера основан на технологии рефлектометрии с временным разрешением TDR (Time Domain Reflectometry). Микроволновые радиоимпульсы малой мощности направляются вниз по зонду, погруженному в технологическую среду, уровень которой нужно определить (рис.5.20). Когда радиоимпульс достигает среды с коэффициентом диэлектрической проницаемости, отличной от проницаемости газа над поверхностью среды, то из-за разности коэффициентов диэлектрических проницаемостей происходит отражение микроволнового сигнала в обратном направлении. Временной интервал между моментом передачи зондирующего импульса и моментом приема эхо-сигнала пропорционален расстоянию до уровня контролируемой среды. Аналогичным образом измеряется расстояние между датчиком и границей раздела двух жидких сред с различными коэффициентами диэлектрической проницаемости. Интенсивность отраженного сигнала зависит от диэлектрической проницаемости среды. Чем выше диэлектрическая проницаемость, тем выше интенсивность отраженного сигнала. Волноводная технология имеют ряд пре-

имущества по сравнению с другими методами измерения уровня, поскольку радиоимпульсы практически невосприимчивы к составу среды, атмосфере резервуара, температуре и давлению.

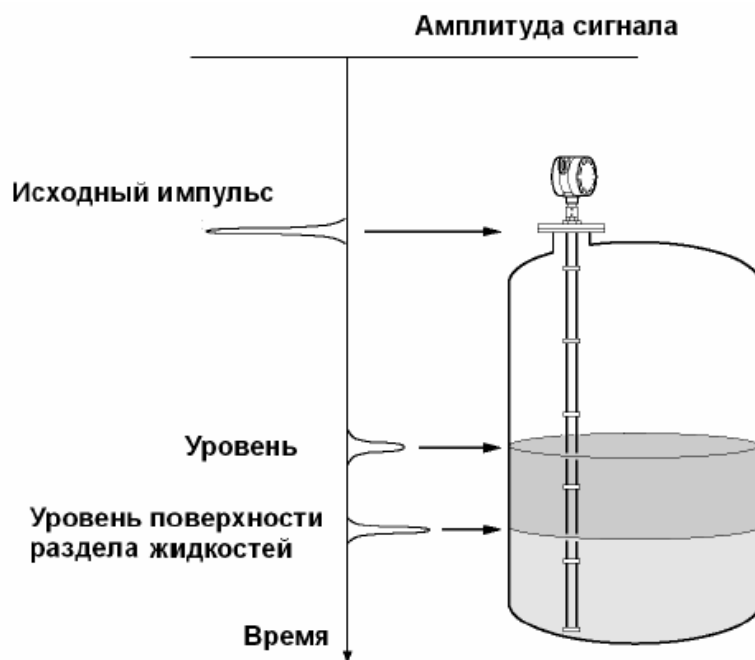


Рис. 5.20. Схема измерения уровня волноводным уровнемером

Поскольку радиоимпульсы направляются по зонду, а не свободно распространяются в пространстве резервуара, то волноводная технология может с успехом применяться для малых и узких резервуаров, а также для резервуаров с узкими горловинами. В случае необходимости съемная голова датчика позволяет заменять модуль электроники, не нарушая герметичности резервуара, что может быть важно при измерении уровня сжиженных газов и аммиака.

Волноводный уровнемер (рис 5.21) включает следующие основные элементы: корпус, электронный модуль, фланцевое или резьбовое соединение с резервуаром и зонд. Корпус уровнемера, состоящий из двух независимых отсеков (отсек электроники и клеммный отсек для подключения кабелей), может быть снят с зонда, при этом открывать резервуар не требуется. Кроме того, корпус такой конструкции повышает надежность и безопасность уровнемера при эксплуатации в опасных производствах. Электронный модуль излучает электромагнитные импульсы, которые распространяются по зонду, выполняет обработку отраженного (принятого) сигнала и выдает информацию в виде аналогового или цифрового сигнала на встроенный жидкокристаллический индикатор или в систему измерения.

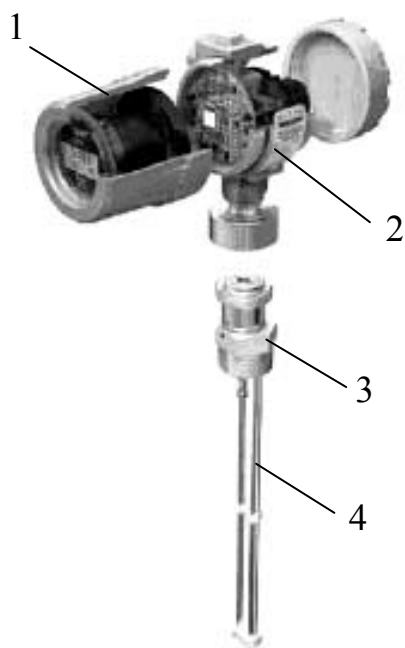


Рис. 5.21. Волноводный уровнемер:

- 1 – корпус;
- 2 – электронный модуль;
- 3 – крепление к резервуару;
- 4 – зонд

В зависимости от условий технологического процесса используется один из пяти типов зондов: коаксиальный, жесткий двухстержневой, жесткий одностержневой, гибкий двухпроводный и гибкий однопроводный. Выбор зонда обуславливается свойствами среды (плотность, вязкость, агрессивность), уровень которой необходимо измерить.

Коаксиальный зонд (рис. 5.22, а) – оптимальное решение для измерения уровня внешней поверхности и уровня раздела двух жидкостей, например, растворителей, спиртов, водных растворов, сжиженных газов и жидкого аммиака.

Коаксиальный зонд обеспечивает самое высокое отношение сигнал/шум. Рекомендуется для измерения уровня жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью, а также для измерений в условиях турбулентности, в присутствии пены или потоков жидкости или пара вблизи зонда (оболочка коаксиального зонда работает как успокоительный колодец).

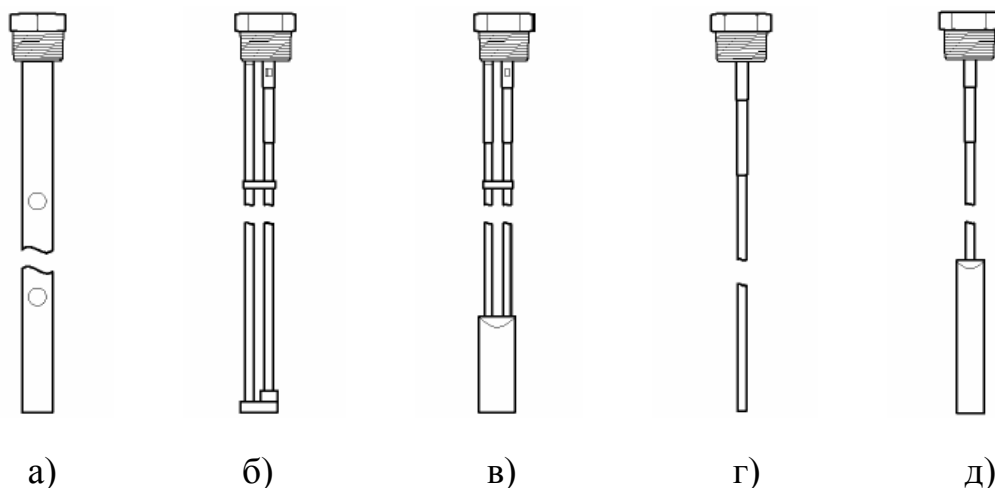


Рис. 5.22. Типы зондов волноводных уровнемеров:

- а) коаксиальный; б) жесткий двухстержневой;
- в) гибкий двухпроводный; г) жесткий одностержневой;
- д) гибкий однопроводный

Он может использоваться в условиях электромагнитных помех, допускается контакт зонда с металлическими конструкциями. Не рекомендуется для сред, склонных к кристаллизации или налипанию, а также для порошков. Максимальный диапазон измерений при использовании коаксиального зонда составляет 6 м.

Двухстержневой жесткий (рис. 5.22, б) или двухпроводной гибкий (рис. 5.22, в) зонды рекомендуются при измерении уровня жидкостей (нефтепродукты, растворители, водные растворы и т.п.). Возможно применение для измерения уровня и раздела жидких сред. Могут применяться с более вязкими жидкостями, чем рекомендовано для коаксиального зонда, однако не следует применять этот зонд для липких продуктов, когда существует вероятность налипания и образования перемычек между двумя стержнями или проводами зонда. Двухстержневой зонд с жесткими стержнями подходит для измерений в диапазоне до 3 м. Для гибкого двухпроводного зонда диапазон измерений до 23,5 м.

Одностержневой жесткий (рис. 5.22, г) или однопроводной гибкий (рис. 5.22, д) зонды менее восприимчивы к налипанию среды и образованию наростов. Они могут применяться для вязких жидкостей, взвесей, водных растворов и алкогольных напитков, а также использоваться для санитарных целей в пищевой и фармацевтической промышленности. Можно использовать для измерения уровня твердых частиц, гранул и порошков, например, зерна, песка, сажи и т.п. Применяются для измерения уровня вязких жидкостей, например, сиропа, меда и т.п., а также водных растворов. Одностержневой зонд рекомендуется для измерений в диапазоне до 3 м, а однопроводный гибкий - до 23,5 м.

5.4. Сигнализаторы уровня

Концевые выключатели предельного уровня (сигнализаторы уровня) формируют выходной сигнал в тех случаях, когда уровень контролируемого материала достигает, поднимается выше или опускается ниже определенного уровня, заданного относительно высоты установки датчика. Примерами могут служить: защита от переполнения, защита оборудования от режима «сухого хода», проверка минимального и максимального уровней заполнения резервуаров. Для определения предельного уровня существуют следующие средства контроля: поплавковые выключатели, концевые выключатели с вибрирующим чувствительным элементом, кондуктометрические выключатели, ёмкостные зонды, погружные магнитные зонды.

В табл.5.1. представлены основные типы средств определения предельного уровня и области их применения.

Таблица 5.1

Средства контроля уровня	Определение предельного уровня	
	Жидкости	Сыпучие материалы
Поплаковые выключатели	Да	Нет
Вибрационные концевые выключатели	Да	Да
Кондуктометрические выключатели	Да	Нет
Емкостные выключатели	Да	Да
Магнитные погружные зонды	Да	Нет

5.4.1. Поплавковые сигнализаторы уровня

Поплавковые сигнализаторы обладают необходимой плавучестью, позволяющей им в незакреплённом состоянии находиться на поверхности жидкости в строго горизонтальном положении. В конкретных применениях поплавковый датчик закрепляется посредством собственного кабельного зажима на высоте, соответствующей предельному уровню жидкости.

Процесс переключения запускается качанием датчика, когда он отклоняется от горизонтального положения в любом направлении, как это представлено на рис.5.23. В качестве коммутационных устройств часто применяются жидкометаллические микровыключатели, в которых в настоящее время вместо ртути используется галинстан (Galinstan – жидкий металлический сплав, включающий галлий, индий и олово и сохраняющий жидкое состояние при температурах выше -19°C).



Рис.5.23. Принцип действия поплавкового сигнализатора

Поплавковый выключатель состоит из корпуса поплавка со встроенным микровыключателем и присоединительного кабеля.

Современные поплавковые датчики используют три разновидности не содержащих ртути коммутационных устройств.

1. Шаровой микровыключатель с определением положения на основе индуктивного метода;

2. Шаровой концевой микровыключатель;

3. Микровыключатель, использующий жидкий металлический сплав Galinstan.

В качестве поплавков применяют преимущественно полые шаровидные или сферо-цилиндрические тела, выполненные из полипропилена, устойчивого к воздействию неконцентрированных кислот и щелочей, большинства растворителей, спирта, бензина, воды, консистентных смазок и масел.

На рис.5.24 представлено регулируемое комбинированное устройство из поплавковых выключателей, позволяющее изменять уровни срабатывания выключателей, если этого потребуют новые эксплуатационные условия. В этом сигнализаторе поплавки настраиваются по концу несущей штанги. Подстройка по уровням срабатывания производится пользователем на месте применения посредством перемещения установочных фиксирующих колец.

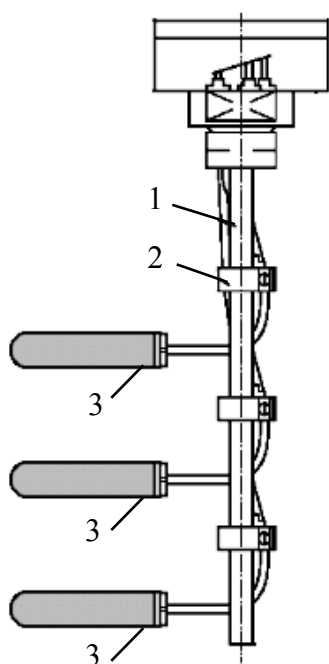


Рис.5.24. Регулируемое комбинированное устройство с поплавковыми выключателями:

1 – несущая штанга;

2 – фиксирующее кольцо;

3 – поплавковый выключатель

на месте применения посредством перемещения установочных фиксирующих колец.

Основные достоинства метода:

- простота;
- прочность;
- невысокая стоимость.

Недостатки:

- непригодны для вязких жидкостей;
- проблемы с плещущимися жидкостями;
- плавучесть зависит от размеров поплавка;
- точка срабатывания зависит от колебаний плотности среды.

5.4.2. Вибрационные сигнализаторы уровня



Рис.5.25. Внешний вид вибрационного сигнализатора

В качестве вибрационных концевых выключателей применяют устройства с резонатором камертонного типа (из-за формы его часто называют колебательной вилкой), в которых пьезоэлектрическим способом возбуждаются сильные механические колебания в диапазоне резо-

нансных частот. Внешний вид вибрационного датчика представлен на рис.5.25. Благодаря высоким механическим качествам вибрирующей системы вполне достаточна весьма малая мощность возбуждения. Размещение чувствительного элемента внутри контролируемой среды вызывает резкое уменьшение амплитуды колебаний вплоть до их полного гашения. Смена состояния колебания состоянием покоя или, наоборот, в виде электрического сигнала предельного уровня поступает на индикатор. При этом функционирование данных устройств не зависит от флуктуаций физических свойств контролируемого вещества.

Вибрационные концевые выключатели можно использовать для определения предельного уровня практически всех жидкостей и сыпучих материалов.

Основные достоинства метода:

- простота;
- не требуется регулировка в месте установки;
- отсутствуют движущиеся части;
- нечувствительны к турбулентности, образованию пены и внешней вибрации;
- допускают любую пространственную ориентацию;
- нечувствительны к большинству физических свойств измеряемого вещества (исключение - плотность);
- проверка функционирования может проводиться на месте монтажа.

Недостатки:

- клейкие вещества и твёрдые частицы в жидкостях могут служить причиной отказов;
- твёрдые частицы могут заклинивать колебательную вилку.

5.4.3. Кондуктометрические сигнализаторы уровня

Этот метод основан на изменении силы тока. При пустом резервуаре сопротивление между двумя электродами бесконечно велико; при погружении концов электродов в проводящую среду сопротивление уменьшается соответственно величине её проводимости. Область применения метода распространяется исключительно на контроль уровня проводящих жидкостей. Следовательно, уровень сыпучих или вязких материалов измерять указанным методом нельзя. Необходимо наличие у контролируемого вещества определённой минимальной проводимости (более 1 мкС/см), чтобы при измерении уровня кондуктометрическим методом можно было получить различимый сигнал изменения тока.

Настоящий метод применяют, главным образом, для измерения предельного уровня в цистернах, баках и паровых котлах. Воспламеняющиеся жидкости, такие как различные виды топлива, масла и растворители, являются диэлектриками, поэтому для них этот метод неприменим в отличие от кислот, щелочей и растворов, содержащих воду и являющихся проводниками. Уровень агрессивных жидкостей определяется без проблем, путём использования электродов, выполненных из высокопрочных материалов. Внешний вид кондуктометрического концевого выключателя представлен на рис.5.26.



Рис.5.26. Внешний вид кондуктометрического концевого выключателя

При реализации кондуктометрического метода два электрода устанавливаются выше поверхности проводящей жидкости, уровень которой контролируется. Когда жидкость достигает той точки, где оба электрода контактируют с жидкостью, электрический ток вызывает срабатывание реле. Если требуется выявить несколько значений уровня, используется соответствующее кратное число электродов. Для того чтобы исключить такие эффекты, как электролиз жидкости или взрыв, применяются постоянный ток достаточно малой величины и переменный ток.

На основе данного метода может быть легко и экономично реализовано определение не только предельного, но и межфазного уровня; напри-

мер, достаточно просто выявляется граница между водой и непроводящими жидкостями в разделителях (сепараторах) масла или бензина.

Основные достоинства метода:

- простота и прочность;
- отсутствие движущихся механических частей;
- нечувствительны к турбулентности;
- технологическим процессом допускаются высокая температура и давление;
- простая регулировка и обслуживание.

Недостатки:

- непригодны для клейких веществ и диэлектриков;
- масляные вещества могут вызывать налипание на электроды тонкого слоя непроводящего покрытия, что может быть причиной отказа.

5.4.4. Ёмкостные сигнализаторы уровня

Название метода предполагает, что в его основе лежит определение изменений электрической ёмкости в зависимости от уровня наполнения резервуара. Конденсатор образован стенкой резервуара и щупом, погруженным в его содержимое. Измерение ёмкости осуществляют, как правило, при помощи резонансных схем или мостов переменного тока с само-



Рис.5.27. Внешний вид емкостного сигнализатора

уравновешиванием. В точном определении уровня решающую роль играют конструкция, изоляция и правильное размещение ёмкостного зонда. Поэтому необходимо учитывать следующие факторы: изоляцию зонда, форму резервуара, давление в резервуаре, температуру контролируемого материала, его зернистость, абразивность, химическую агрессивность, вязкость, возможность образования конденсата или пены.

Измерительный зонд в зависимости от требуемой длины выполнен из проволочного тросика, металлического стержня или трубки.

Внешний вид емкостного конечного выключателя представлен на рис.5.27.

Основные достоинства метода:

- простота установки и эксплуатации;
- многофункциональность применения;
- возможность использования с клейкими веществами;
- активная компенсация влияния раскачивания зонда.

5.4.5. Магнитные сигнализаторы уровня

Магнитные погружные зонды предельного уровня разработаны для использования в очищенных жидкостях, таких как вода, растворители, масла, различные виды топлива. В зависимости от вида контролируемой жидкости возможны различные исполнения зондов:

- пластиковые для агрессивных кислот и щелочей;
- из нержавеющей стали для воды, масел и т.п.;
- из нержавеющей стали во взрывозащищённом исполнении для горючих жидкостей, таких как топливо, растворители, спирты.

Эти датчики работают следующим образом: поплавков, направляемый трубкой зонда, плавает на поверхности жидкости; тороидальный магнит, смонтированный на поплавке, в соответствующем положении замыкает язычковые герметизированные контакты, установленные на направляющей трубке, посредством магнитного поля. Внешний вид магнитного погружного зонда представлен на рис.5.28.



Рис.5.28. Внешний вид магнитного погружного зонда

Основные достоинства метода:

- простой принцип действия;
- несложный монтаж;
- несложное техническое обслуживание.

Недостатки:

- плавучесть зависит от размера поплавка;
- точки переключения зависят от плотности среды;
- максимальная длина зонда - около 6 м;
- минимально допустимая плотность контролируемой среды равна $0,7 \text{ г/см}^3$.
- можно использовать только в очищенных жидкостях.

Контрольные вопросы

1. На какие основные группы делятся приборы для измерения уровня?
2. Как классифицируются приборы для измерения уровня по принципу действия?
3. На каком принципе основана работа визуальных уровнемеров?
4. Повлияет ли избыточное давление в емкости на показания буйкового уровнемера?
5. Повлияет ли избыточное давление в емкости на показания емкостного уровнемера?
6. На чем основано измерение уровня радиоизотопным уровнемером?
7. Какие свойства измеряемой жидкости оказывают влияние на результат измерения поплавкового уровнемера? Буйкового уровнемера? Радиоизотопного уровнемера?
8. Чем ограничен диапазон измерения буйкового уровнемера?
9. Какие приборы могут быть использованы для измерения уровня гидростатическим способом и почему?
10. Каково назначение уравнительного сосуда при гидростатическом способе измерения уровня?
11. На чем основано действие пьезометрического уровнемера?
12. В каких случаях приходится применять бесконтактные уровнемеры?
13. В чем преимущество радиоизотопных уровнемеров? Недостатки?
14. Какие свойства контролируемой среды используются в электрических уровнемерах?
15. В каких случаях нельзя применять радиоизотопные уровнемеры?
16. Влияют ли на результат измерения уровня ультразвуковым методом химические и физические свойства среды?
17. Из каких элементов состоит радарный уровнемер?
18. В чем состоит отличие технологии FMCW от импульсной в радарных системах контроля уровня?
19. Поясните принцип действия волноводного уровнемера.
20. В чем состоит основное отличие радарного уровнемера от волноводного?
21. Какие вы знаете сигнализаторы уровня?
22. На чем основан принцип поплавкового сигнализатора? Вибрационного? Кондуктометрического? Емкостного?

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Градуировочные таблицы термопреобразователей сопротивления платиновых

Температура термометра, °C	Сопротивление термопреобразователя, Ом						
	1П	5П	10П	50П	100П	500П	гр.21
-150	0,3878	1,9390	3,878	19,390	38,78	193,90	17,847
-100	0,5964	2,9820	5,964	29,820	59,64	298,20	27,440
-90	0,6374	3,1870	6,374	31,870	63,74	318,70	29,330
-80	0,6783	3,3915	6,783	33,915	67,83	339,15	31,210
-70	0,7190	3,5950	7,190	35,950	71,90	359,50	33,080
-60	0,7596	3,7980	7,596	37,980	75,96	379,80	34,940
-50	0,8000	4,0000	8,000	40,000	80,00	400,00	36,800
-40	0,8403	4,2015	8,403	42,015	84,03	420,15	38,650
-30	0,8804	4,4020	8,804	44,020	88,04	440,20	40,500
-20	0,9204	4,6020	9,204	46,020	92,04	460,20	42,340
-10	0,9602	4,8010	9,602	48,010	96,02	480,10	44,170
0	1,0000	5,0000	10,000	50,000	100,00	500,00	46,000
10	1,0396	5,1980	10,396	51,980	103,96	519,80	47,824
20	1,0792	5,3960	10,792	53,960	107,92	539,60	49,643
30	1,1186	5,5930	11,186	55,930	111,86	559,30	51,450
40	1,1578	5,7890	11,578	57,890	115,78	578,90	53,264
50	1,1970	5,9850	11,970	59,850	119,70	598,50	55,060
60	1,2361	6,1805	12,361	61,805	123,61	618,05	56,862
70	1,2750	6,3750	12,750	63,750	127,50	637,50	58,653
80	1,3138	6,5690	13,138	65,690	131,38	656,90	60,438
90	1,3525	6,7625	13,525	67,625	135,25	676,25	62,210
100	1,3911	6,9555	13,911	69,555	139,11	695,55	63,992
110	1,4296	7,1480	14,296	71,480	142,96	714,80	65,761
120	1,4679	7,3395	14,679	73,395	146,79	733,95	67,524
130	1,5061	7,5305	15,061	75,305	150,61	753,05	69,282
140	1,5443	7,7215	15,443	77,215	154,43	772,15	71,030
150	1,5823	7,9115	15,823	79,115	158,23	791,15	72,782
160	1,6202	8,1010	16,202	81,010	162,02	810,10	74,523
170	1,6579	8,2895	16,579	82,895	165,79	828,95	76,259
180	1,6956	8,4780	16,956	84,780	169,56	847,80	77,990
190	1,7331	8,6655	17,331	86,655	173,31	866,55	79,715
200	1,7705	8,8525	17,705	88,525	177,05	885,25	81,435
210	1,8078	9,0390	18,078	90,390	180,78	903,90	83,150
220	1,8450	9,2250	18,450	92,250	184,50	922,50	84,859
230	1,8821	9,4105	18,821	94,105	188,21	941,05	86,562
240	1,9190	9,5950	19,190	95,950	191,90	959,50	88,262
250	1,9559	9,7795	19,559	97,795	195,59	977,95	89,960
260	1,9928	9,9640	19,928	99,640	199,28	996,40	91,642
270	2,0292	10,1460	20,292	101,460	202,92	1 014,60	93,330
280	2,0657	10,3285	20,657	103,285	206,57	1 032,85	95,001
290	2,1021	10,5105	21,021	105,105	210,21	1 051,05	96,680
300	2,1383	10,6915	21,383	106,915	213,83	1 069,15	98,338
350	2,3178	11,5890	23,178	115,890	231,78	1 158,90	106,600
400	2,4944	12,4720	24,944	124,720	249,44	1 247,20	114,720
450	2,6681	13,3405	26,681	133,405	266,81	1 334,05	122,700
500	2,8389	14,1945	28,389	141,945	283,89	1 419,45	130,550
550	3,0067	15,0335	30,067	150,335	300,67	1 503,35	138,270
600	3,1717	15,8585	31,717	158,585	317,17	1 585,85	145,850
650	3,3323	16,6615	33,323	166,615	333,23	1 666,15	153,300
700	3,4912	17,4560	34,912	174,560	349,12	1 745,60	160,508
750	3,6472	18,2360	36,472	182,360	364,72	1 823,60	167,656
800	3,8002	19,0010	38,002	190,010	380,02	1 900,10	174,671

Приложение 2

Градуировочные таблицы термопреобразователей сопротивления медных и никелевых

Температура термометра, °C	Сопротивление термопреобразователя ТСМ, Ом				Сопротивление термо- преобразователя ТСН, Ом	
	100М	50М	10М	гр. 23	100Н	50Н
-200	12,170	6,085	1,217	-	-	-
-150	34,210	17,105	3,421	-	-	-
-100	56,530	28,265	5,653	-	-	-
-50	78,450	39,225	7,845	41,710	74,210	37,105
-40	82,780	41,390	8,278	43,970	79,100	39,550
-30	87,100	43,550	8,710	46,230	84,120	42,060
-20	91,410	45,705	9,141	48,480	89,280	44,640
-10	95,710	47,855	9,571	50,740	94,570	47,285
0	100,000	50,000	10,000	53,000	100,000	50,000
5	102,140	51,070	10,214	54,130	102,770	51,385
10	104,280	52,140	10,428	55,260	105,560	52,780
15	106,420	53,210	10,642	56,390	108,400	54,200
20	108,560	54,280	10,856	57,520	111,260	55,630
25	110,690	55,345	11,069	58,650	114,160	57,080
30	112,830	56,415	11,283	59,770	117,100	58,550
35	114,970	57,485	11,497	60,900	120,060	60,030
40	117,110	58,555	11,711	62,030	123,070	61,535
45	119,250	59,625	11,925	63,160	126,100	63,050
50	121,390	60,695	12,139	64,290	129,170	64,585
55	123,530	61,765	12,353	65,420	132,270	66,135
60	125,670	62,835	12,567	66,550	135,410	67,705
65	127,800	63,900	12,780	67,680	138,580	69,290
70	129,940	64,970	12,994	68,810	141,780	70,890
75	132,080	66,040	13,208	69,930	145,020	72,510
80	134,220	67,110	13,422	71,060	148,290	74,145
85	136,360	68,180	13,636	72,190	151,600	75,800
90	138,500	69,250	13,850	73,320	154,940	77,470
95	140,640	70,320	14,064	74,450	158,310	79,155
100	142,780	71,390	14,278	75,580	161,720	80,860
105	144,910	72,455	14,491	76,710	165,210	82,605
110	147,050	73,525	14,705	77,840	168,750	84,375
115	149,190	74,595	14,919	78,970	172,320	86,160
120	151,330	75,665	15,133	80,090	175,950	87,975
125	153,470	76,735	15,347	81,320	179,620	89,810
130	155,610	77,805	15,561	82,350	183,340	91,670
135	157,750	78,875	15,775	83,480	187,100	93,550
140	159,890	79,945	15,989	84,610	190,910	95,455
145	162,020	81,010	16,202	85,740	194,770	97,385
150	164,160	82,080	16,416	86,870	198,680	99,340
155	166,300	83,150	16,630	88,000	202,640	101,320
160	168,440	84,220	16,844	89,130	206,650	103,325
165	170,580	85,290	17,058	90,250	210,710	105,355
170	172,720	86,360	17,272	91,380	214,820	107,410
175	174,860	87,430	17,486	92,510	218,990	109,495
180	177,000	88,500	17,700	93,640	223,210	111,605
185	179,130	89,565	17,913	-	-	-
190	181,270	90,635	18,127	-	-	-
195	183,410	91,705	18,341	-	-	-
200	185,550	92,775	18,555	-	-	-

Приложение 3

Градуировочная характеристика преобразователей гр. ХА (свободные концы при 0°C)

Т _{раб.спая.} °C	Термо-ЭДС преобразователя, мВ									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,30	14,72	15,14	15,56	15,99
400	16,40	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,94	19,37	19,79	20,22
500	20,65	21,08	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,63	24,06	24,49
600	24,91	25,33	25,76	26,19	26,61	27,04	27,46	27,88	28,30	28,73
700	29,15	29,57	29,99	30,41	30,83	31,24	31,66	32,08	32,49	32,90
800	33,32	33,72	34,13	34,55	34,95	35,36	35,76	36,17	36,57	36,97
900	37,37	37,77	38,17	38,57	38,97	39,36	39,76	40,15	40,54	40,93
1000	41,32	41,71	42,09	42,48	42,88	43,26	43,64	44,02	44,40	44,78
1100	45,16	45,54	45,91	46,29	46,66	47,03	47,40	47,77	48,14	48,50
1200	48,87	49,23	49,59	49,95	50,31	50,67	51,02	51,38	51,73	52,08
1300	52,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Градуировочная характеристика преобразователей гр. ХК (свободные концы при 0°C)

Т _{раб.спая.} °C	Термо-ЭДС преобразователя, мВ									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0,65	1,31	1,98	2,66	3,55	4,05	4,76	5,48	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,46	12,24	13,03	13,84
200	14,66	15,48	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08
300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,02	28,89	29,76	30,62
400	31,49	32,35	33,22	34,08	34,95	35,82	36,68	37,55	38,42	39,29
500	40,16	41,02	41,91	42,79	43,68	44,56	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	49,90	50,78	51,66	52,53	53,41	54,28	55,15	56,03	56,90
700	57,77	58,64	59,51	60,37	61,24	62,11	62,97	63,83	64,70	65,56
800	66,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов И. Н. Создание полупроводниковых датчиков давлений на основе структуры "кремний на диэлектрике" // Автоматизация и управление в технических системах, 2005. - Вып. 24.
2. Бармин А.В. Радарные системы контроля уровня. //Современные технологии автоматизации. №4, 2002.
3. Белевцев А. и др. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие. //Современные технологии автоматизации. №2, 2004.
4. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Всемирный справочник по расходомерам. Справочное пособие под ред. Йессе Йодер.- Уейкфилд, Массачусетс "Флоу Рисерч Инк."
6. Гарсия В. Измерение температуры: теория и практика. //Современные технологии автоматизации. №1, 1999.
7. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др. Температурные измерения: Справочник. - Киев: Наукова Думка, 1989.
8. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. - М., Энергоатомиздат, 1992.
9. Государственный стандарт РФ ГОСТ 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Москва: Госстандарт России, 2001.
10. Гуртовцев А. Измерение давления в автоматизированных системах. //Современные технологии автоматизации. №4, 2001.
11. ГСИ РМГ 29-99. Переиздание - сентябрь 2003 г. Метрология. Основные термины и определения.
12. Жарковский Б.И. Приборы автоматического контроля и регулирования. М.: Высш.шк., 1989.
13. Жданкин В.К. Сигнализаторы изменения уровня. //Современные технологии автоматизации. №2, 2002.
14. Измерения в промышленности: Справ. изд. в 3х кн. / Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем./Под ред. Профоса П. - 2е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1990.
15. Каратаев Р. Н., Копырин М. А. Расходомеры постоянного перепада давления. М.: Машиностроение, 1980.

16. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1975.
17. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы. - М.: Машиностроение, 1983.
18. Межгосударственный стандарт ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. - Минск: Изд-во Стандартов, 1998.
19. Межгосударственный стандарт ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические условия. - Минск: Изд-во Стандартов, 1998.
20. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.271-77. Средства измерений давления. Термины и определения. - Москва: Изд-во Стандартов, 1977.
21. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.1-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования – М.: Стандартинформ, 2007.
22. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.2-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования– М.: Стандартинформ, 2007.
23. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.3-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования– М.: Стандартинформ, 2007.
24. Межгосударственный стандарт ГОСТ 8.586.4-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 4. Трубы Вентури. Технические требования– М.: Стандартинформ, 2007.
25. Олейник Б.М. и др. Приборы и методы температурных измерений. - М.: Издательство стандартов, 1987.
26. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы.- М.: Энергия, 1978.
27. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник/Под ред. В.В. Черенкова.- Л.: Машиностроение, 1987.
28. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: Учебник для вузов – М.: Издательский центр «Академия», 2003.

29. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар: Справочник. - М.: Металлургия, 1983.
30. Тематический каталог ПГ «Метран», 2007.
31. Тематический каталог фирмы «Krohne», 2006.
32. Технические средства автоматизации химических производств: Справочное изд.-М.:Химия, 1991.
33. Фарзана Н.Г. и др. Технологические измерения и приборы.- М.:Высш.шк., 1989.
34. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям и приборам.-М.: Энергоатомиздат, 1990.
35. Шкатов Е.Ф. Технологические измерения и КИП на предприятиях химической промышленности.-М.: Химия, 1986.
36. Электропневмоавтоматика в производственных процессах: Учеб.пособие под ред. Пашкова Е.В. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003.
37. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. - М.: Издательство стандартов, 1990.
38. Яковлев В. Структура измерительной системы на базе пассивных датчиков. // Современные технологии автоматизации. №1, 2002.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

