

ББК 31.32

И 20

УДК 621.1 : 53.08 (075.6)

Рецензенты: Киевский политехнический институт, А. А. Щербаков

Иванова Г. М. и др.

И 20 Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов/Г. М. Иванов, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 232 с., ил.

75 коп. — 30 000 экз.

Рассмотрены современные методы и средства измерения основных теплотехнических параметров: температуры, давления, расхода, уровня, состава газа, концентрации растворов, влажности и некоторых других. Дается анализ преимуществ и недостатков, особенностей применения и погрешностей отдельных методов и средств измерения.

Книга является учебником по курсу «Теплотехнические измерения и приборы» для студентов вузов основных теплотехнических специальностей.

И 2303010000-484 188-84  
051(01)-84

ББК 31.32

6П2.2

© Энергоатомиздат, 1984

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный уровень развития энергетических и других промышленных установок характеризуется интенсификацией технологических процессов с использованием агрегатов большой единичной мощности. Например, в теплоэнергетике единичные мощности возросли за 30 лет в десятки раз, а в атомной энергетике — в сотни. Примерно так же возросли скорости протекания технологических процессов, число измеряемых параметров на одном агрегате, которое в настоящее время исчисляется тысячами.

Поэтому надежность средств измерения и информационно-измерительных систем во многих случаях определяет надежность агрегата в целом. Без достоверных значений параметров и автоматического контроля за этими значениями в большинстве случаев нельзя управлять процессом или агрегатом, без средств измерения невозможна автоматизация. Особенно большое значение приобретают вопросы получения достоверных значений измеряемых параметров в связи с задачами комплексной автоматизации технологических процессов и более эффективного использования производственного потенциала. Решение этих задач требует анализа процессов и их технико-экономических показателей, а для этого нужны надежные и точные средства измерения.

Вопросам измерения технологических параметров, разработке новых методов и средств измерения, повышению точности измерений во всех странах мира уделяется большое внимание.

В книге рассмотрены физические явления, принципы измерения, которые положены в основу работы того или иного средства измерения и принципиальные схемы измерительных преобразователей и приборов, применяемых в промышленности. Измерение рассматривается как единый процесс

совместной работы чувствительных элементов, преобразователей и измерительных приборов с учетом влияния различных факторов.

Учебник предназначен для студентов специальностей тепловые электрические станции, водный режим и водоподготовка на тепловых и атомных электростанциях, промышленная теплоэнергетика, атомные электрические станции, процессы и аппараты кондиционирования воздуха летательных аппаратов, криогенная техника. Содержание учебника соответствует учебным программам курсов «Теплотехнические измерения и приборы», «Тепловые и технологические измерения» и «Теплотехнические измерения» вышеуказанных специальностей. Книга может быть использована студентами других специальностей при изучении теплотехнических и технологических измерений, а также инженерно-техническими работниками, связанными с теплотехническими измерениями.

Предисловие, гл. 1—9, 15 написаны В. С. Чистяковым, гл. 10, 12, 13, 14 — Н. Д. Кузнецовым, гл. 11, 16, 17, 18 — Г. М. Ивановой. Учебник написан на основе курсов, читаемых авторами в течение многих лет в Московском ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции энергетическом институте (МЭИ).

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам: профессору кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов Киевского политехнического института В. В. Ажогину и всему коллективу этой кафедры, а также А. А. Щербакову за ценные замечания и предложения, способствовавшие улучшению качества книги.

Все замечания и предложения по книге просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

*Авторы*

## Глава первая

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

## 1.1. Измерения. Виды измерений

Измерение представляет собой процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств [1].

Во многих случаях в процессе измерения происходит сравнение измеряемой величины с физической, которой присвоено числовое значение, равное 1, и которая называется единицей физической величины, или *единицей измерения*. Результат измерения — это численное значение величины, найденное путем ее измерения, например путем сравнения ее с единицей измерения. Результат может быть выражен следующим образом:

$$R = Q/q, \quad (1.1)$$

где  $Q$  — измеряемая физическая величина;  $q$  — единица физической величины, или единица измерения;  $R$  — результат измерения, или численное значение измеряемой величины.

По способу получения числового значения измеряемой величины все технические измерения можно разделить на прямые и косвенные. В лабораторной практике и научных исследованиях имеют место также совокупные и совместные измерения. *Прямые измерения* называются такие, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Например, измерение температуры термометром, давления — манометром. Результат измерения может быть получен также путем *косвенных измерений*, когда численное значение находят на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной определенной зависимостью

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.2)$$

где  $y$  — искомая величина;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — численные значения величин, измеренных прямым способом.

Примерами косвенных измерений могут быть определение плотности те-

ла по результатам измерения массы и объема, определение удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения.

Измерения производятся на основе физических явлений, определяющих *принцип измерения*, например измерение температуры по расширению вещества; измерение вакуума по подъему столба уравнивающей жидкости. Для реализации тех или иных принципов измерения применяются различные технические средства. Техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства, называется *средством измерения*. Совокупность правил, определяющих принципы и средства измерения, называется *методом измерения*.

В технических измерениях широкое распространение получили методы непосредственной оценки, дифференциальный и нулевой. В *методе непосредственной оценки* значение измеряемой величины определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Этот метод применяется, например, при измерении давления пружинным манометром, силы тока — амперметром. В *дифференциальном методе* на измерительный прибор воздействует разность измеряемой и базовой (значение которой известно) величин, например измерение состава газовой смеси по теплопроводности путем сравнения с теплопроводностью воздуха. Этот метод позволяет получить достаточно точные результаты даже при применении средств измерения этой разности не очень высокой точности. Однако для этого необходимо иметь базовую величину, значение которой близко к измеряемой величине и известно с высокой точностью. В *нулевом методе* измеряемую величину сравнивают с величиной, значение которой известно, но разность между ни-

ми сводится к нулю путем изменения известной величины. Применяемый в этом методе измерительный прибор служит только для установления факта равенства двух величин или равенства нулю их разностей. Примером нулевого метода измерения может служить компенсационный метод измерения термо-ЭДС, измерение сопротивления уравновешенным мостом. Нулевой метод обеспечивает высокую точность измерения, определяемую в основном точностью задания известной величины, которой уравновешивается измеряемая величина.

## 1.2. Средства измерений, их элементы и параметры

Средства измерений должны иметь нормированные метрологические характеристики, т. е. определенные численные значения величин и свойств, определяющих точность и достоверность результатов измерения. Средства измерения, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, называется *измерительным прибором*. На измерительном приборе наблюдатель может прочесть или отсчитать численное значение измеряемой величины. Измерительные приборы бывают аналоговые и цифровые. В *аналоговом измерительном приборе* показания являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины, в *цифровом* показания представлены в цифровой форме, которая является результатом дискретного преобразования сигналов измерительной информации. Измерительные приборы разделяются на показывающие и регистрирующие. В *показывающих приборах* значения считываются по шкале или цифровому табло. В регистрирующих приборах предусмотрена регистрация показаний в виде записи на диаграммной бумаге либо путем печати в цифровой форме. В измерительных приборах может осуществляться интегрирование измеряемой величины по времени либо по другой независимой переменной.

*Измерительным преобразователем* называется средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, преоб-

разования, обработки или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Человек своими органами чувств не может воспринять сигнал измерительного преобразователя. *Первичным измерительным преобразователем* называется измерительный преобразователь, на вход которого воздействует измеряемая величина. Часто первичные измерительные преобразователи называют датчиками. Часть первичного измерительного преобразователя, находящегося под непосредственным воздействием измеряемой величины, называется *чувствительным элементом*. Измерительные приборы и преобразователи в зависимости от рода измеряемой величины имеют соответствующие названия, например термометры, манометры, дифманометры, расходомеры, газоанализаторы, уровнемеры, концентратомеры, кислородомеры, влагомеры и т. д.

Отсчетное устройство показывающих аналоговых измерительных приборов состоит из шкалы и указателя (стрелочного или светового). На рис. 1.1 изображена шкала измерительного прибора. Те отметки шкалы, у которых проставлено числовое значение, называются *числовыми отметками шкалы* (иногда их называют оцифрованными отметками шкалы). Промежуток между двумя соседними отметками шкалы называется *делением шкалы*. Разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы, называется *ценой деления шкалы*. Шкала с постоянными делениями и постоянной ценой деления называется *равномерной шкалой*.

Значения измеряемой величины, определяемые по отсчетному устройству и выраженные в принятых единицах измеряемой величины, называются *показаниями измерительного прибора*. Наименьшее значение измеряемой величины, указанное на шкале, назы-



Рис. 1.1. Шкала измерительного прибора

вается начальным значением шкалы, а наибольшее значение — конечным значением шкалы. Область значений шкалы, ограниченная конечным и начальными значениями шкалы, называется *диапазоном показаний*. Область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений, называется *диапазоном измерений* измерительного прибора или измерительного преобразователя. В технических приборах диапазон измерений и диапазон показаний, как правило, совпадают. Пределами измерений называются наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений. Шкалы приборов бывают односторонними, двусторонними и безнулевыми. В односторонних шкалах один из пределов измерения прибора равен нулю. Например, шкала  $0-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , шкала  $-0,1\div 0\text{ МПа}$ . В двусторонних шкалах нулевое значение расположено на шкале. Например, шкала  $-50\div 0\div +100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; шкала  $-0,1\div 0\div 0,15\text{ МПа}$ . В безнулевых шкалах на шкале нет нулевого значения, например шкала  $200-600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Кроме отдельных средств измерения и измерительных систем применяются сложные информационно-измерительные системы, позволяющие не только осуществлять автоматические измерения во многих точках (число измерительных каналов может исчисляться тысячами), но и производить необходимую обработку результатов измерения по заданным алгоритмам. В связи с этим особенно остро возникла необходимость унификации сигналов, поступающих на вход измерительных преобразователей и входных устройств информационно-вычислительных машин. Унификация сигналов позволяет свести к минимуму разнообразия измерительных приборов, обеспечивает взаимозаменяемость средств измерения. В нашей стране

создана Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), которая строится по блочно-модульному принципу и имеет ветви, объединяющие приборы с пневматическими, гидравлическими, электрическими (токовыми, напряжения, частотными и импульсными) входными и выходными сигналами, для которых установлены унифицированные значения по ГОСТ 26.010-80, 26.011-80, 26.012-80, 26.013-81, 26.014-81 и 26.015-81 (см. § 10.1).

В зависимости от назначения и роли, которую они выполняют в процессе измерения, средства измерения делятся на рабочие, образцовые и эталоны. *Рабочие средства измерения* предназначены для практических измерений во всех отраслях народного хозяйства. Они подразделяются на средства измерения повышенной точности и технические.

*Образцовые средства измерений* предназначены для передачи размеров единиц физических величин от эталонов или других точных средств измерений рабочим средствам измерений. Образцовые средства измерений 1-го разряда поверяются, как правило, непосредственно по эталонам. Образцовые средства измерений 2-го и последующих разрядов поверяются по образцовым средствам измерения 1-го и последующих разрядов. По образцовым средствам измерения поверяются и градуируются рабочие средства измерения.

*Эталоны* служат для воспроизведения и хранения единиц физических величин и передачи их размера через образцовые рабочие средства измерения, применяемым в народном хозяйстве. Таким образом осуществляется система передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем средствам измерений с помощью образцовых средств измерений.

## Глава вторая

### ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОЦЕНКА

#### 2.1. Общие сведения о погрешностях

При измерениях обычно получается значение измеряемой физической величины, отличающееся от ее *истинного значения*. Как правило, истинное зна-

чение неизвестно и вместо него используют *действительное значение физической величины* (ГОСТ 16263-70), которое находится экспериментально и настолько приближается к истинному значению, что для данной цели может

быть использовано вместо него. Значение величины, найденное путем ее измерения, называется результатом измерения. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называется *погрешностью измерения*. Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины, называется *абсолютной погрешностью измерения*:

$$\Delta x = x - x_{\text{ист}}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta x$  — абсолютная погрешность;  $x$  — результат измерения;  $x_{\text{ист}}$  — истинное значение измеряемой величины.

Отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины называется *относительной погрешностью измерения*. Относительная погрешность может быть выражена в процентах. Измерительные приборы часто характеризуются *приведенной погрешностью*, которая определяется как отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению. За нормирующее значение чаще всего принимается диапазон измерения прибора. Приведенная погрешность, как правило, выражается в процентах.

Погрешность измерения состоит из нескольких составляющих, которые классифицируются по ряду признаков. По природе своего возникновения погрешности могут зависеть от средств измерения, метода измерения, считывания и ряда других причин. Составляющая погрешности измерения, зависящая от погрешностей применяемых средств измерений, называется *погрешностью средств измерения*. Составляющая погрешности измерения, вызванная несовершенством метода измерения, называется *погрешностью метода измерения*, или *методической погрешностью*. Например, мы измеряем длину кривой линии линейкой. Во-первых, у нас возникает методическая погрешность измерения за счет того, что использование линейки для измерения длины кривой является методом несовершенным. Во-вторых, действительная длина линейки не соответствует длине, указанной на шкале линейки. В связи с этим возникает составляющая погрешности, вызванная несовершенством средства измерения (линейки), которая является погрешностью средства измерения.

Целью вычисления погрешностей измерений является оценка точности результата измерения или введение поправок в результаты измерений. *Точностью измерений* называется качество измерений, отражающее близость их результатов к действительному значению измеряемой величины. Стремясь повысить точность, мы должны уменьшить погрешности измерения. Однако пути повышения точности часто сложны и дорогостоящи. Поэтому всегда следует сначала оценить целесообразную точность, которая зависит от конкретных условий и целей измерения, и в случае необходимости принять меры к ее повышению.

Погрешности измерения разделяют на систематические, случайные и грубые. Составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или изменяющаяся по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины, называется *систематической погрешностью измерения*. Составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины, называется *случайной погрешностью измерения*. Погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях, называется *грубой погрешностью измерения*. Ранее грубые погрешности назывались промахами.

Систематические погрешности имеют определенное значение и знак, они могут быть устранены введением поправки. *Поправкой* называется значение величины, прибавляемое к полученному при измерении значению с целью исключения систематической погрешности. Что касается случайных погрешностей, то их оценка может быть проведена только по результатам многократных измерений.

Случайными погрешностями называются также, о появлении которых не может быть сделано точного предсказания. Чтобы выявить случайную погрешность, необходимо провести ряд повторных измерений одной и той же величины. Если результат каждого измерения будет отличаться от других результатов измерений, то имеет место случайная погрешность. Оценить эти погрешности можно на основании теории вероятностей и математической статистики, которые дают методы оценки степени приближения резуль-

тата измерения к действительному значению измеряемой величины, дают возможность оценить вероятные границы погрешностей [2], а также позволяют уточнить результат, т. е. найти значение измеряемой величины, более близкое к действительному значению, чем результат однократного наблюдения.

## 2.2. Оценка и учет случайных погрешностей

Случайные погрешности являются результатом воздействия большого числа факторов, не зависящих один от другого. Каждый из этих факторов оказывает малое влияние на результаты измерения, однако суммарное влияние всех факторов может быть значительным. Эти факторы могут быть обусловлены неизвестным влиянием температуры на те или иные части измерительного прибора, обратимыми и необратимыми изменениями характеристик измерительного преобразователя, например в результате гистерезиса, трения в опорах измерительных приборов и т. д. Погрешности отдельных измерений имеют разброс как по величине, так и по знаку. Хотя эти погрешности точно определить нельзя, их можно оценить и охарактеризовать с помощью статистических методов. Случайная величина (или погрешность) будет полностью описана с вероятностной точки зрения, если будет задан закон *распределения вероятностей*, т. е. указано, какова вероятность появления тех или иных значений случайной величины. Из этого закона можно получить все практически важные сведения о случайной величине.

Результаты измерений, содержащие случайную погрешность, можно представить графически (рис. 2.1). По оси абсцисс отложены результаты измерений, содержащие случайные погрешности, а по оси ординат — плотность вероятности их появления.

Для большинства измерений имеет место так называемый нормальный закон распределения случайных ошибок, в основу которого положены следующие предположения: ошибки измерений могут принимать значения, опреде-

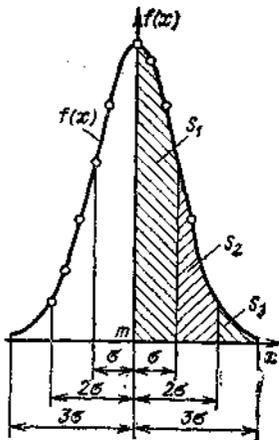


Рис. 2.1. Нормальное распределение погрешностей

ляемые непрерывным рядом; при большом числе измерений ошибки одинакового значения, но разного знака встречаются одинаково часто; частота (вероятность) появления ошибок уменьшается с увеличением их значения.

Для нормального закона распределения погрешностей наиболее вероятным значением измеряемой величины является математическое ожидание  $m$ , которое оценивается как среднее арифметическое значение по формуле

$$\bar{m} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.2)$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  — значения измеряемой величины;  $n$  — число измерений.

Чем больше число измерений  $n$ , тем ближе  $\bar{m}$  к истинному значению математического ожидания. Случайные ошибки (погрешности) для каждого измерения определяются из выражения

$$\Delta = x - m. \quad (2.3)$$

Нормальный закон распределения случайной величины (рис. 2.1) характеризуется выражением для плотности вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.4)$$

где  $f(x)$  — плотность вероятности измеренного значения параметра;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение;  $x$  — измеренное значение параметра, искаженное случайными ошибками. Формула (2.4) может быть записана в виде

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.5)$$

Математическое ожидание  $m$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  полностью определяют нормальный закон распределения случайной величины (2.4). Среднее квадратическое отклонение определяется как корень квадратный из дисперсии случайной величины  $\sigma = \sqrt{D}$ . Дисперсия случайной величины характеризует рассеяние, разбросанность значений случайной величины около ее математического ожидания.

Дисперсия случайной величины оценивается по формуле

$$\begin{aligned} \bar{D}[x] &= \\ &= \frac{(x_1 - m)^2 + (x_2 - m)^2 + \dots + (x_n - m)^2}{n - 1} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m)^2}{n - 1}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Среднее квадратическое отклонение по считается из выражения

$$\bar{\sigma}[x] = \sqrt{\bar{D}[x]} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m)^2}{n - 1}}. \quad (2.7)$$

Для вычисления вероятности появления тех или иных значений случайной величины или случайной погрешности необходимо проинтегрировать выражения для плотности вероятности (2.4) и (2.5) в интересующем интер-

Таблица 2.1. Значения нормальной функции распределения

$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$
-0,00	0,5000	-1,30	0,0968	0,00	0,5000	1,30	0,9032
-0,05	0,4801	-1,35	0,0885	0,05	0,5199	1,35	0,9115
-0,10	0,4602	-1,40	0,0808	0,10	0,5398	1,40	0,9192
-0,15	0,4404	-1,45	0,0735	0,15	0,5596	1,45	0,9265
-0,20	0,4207	-1,50	0,0668	0,20	0,5793	1,50	0,9332
-0,25	0,4013	-1,55	0,0606	0,25	0,5987	1,55	0,9394
-0,30	0,3821	-1,60	0,0548	0,30	0,6179	1,60	0,9452
-0,35	0,3632	-1,65	0,0495	0,35	0,6368	1,65	0,9505
-0,40	0,3446	-1,70	0,0446	0,40	0,6554	1,70	0,9554
-0,45	0,3264	-1,75	0,0401	0,45	0,6736	1,75	0,9599
-0,50	0,3085	-1,80	0,0359	0,50	0,6915	1,80	0,9641
-0,55	0,2912	-1,85	0,0322	0,55	0,7088	1,85	0,9678
-0,60	0,2743	-1,90	0,0288	0,60	0,7257	1,90	0,9712
-0,65	0,2578	-1,91	0,0256	0,65	0,7422	1,95	0,9744
-0,70	0,2420	-2,00	0,0228	0,70	0,7580	2,00	0,9772
-0,75	0,2266	-2,20	0,0139	0,75	0,7731	2,20	0,9861
-0,80	0,2119	-2,40	0,0082	0,80	0,7881	2,40	0,9918
-0,85	0,1977	-2,60	0,0047	0,85	0,8023	2,60	0,9953
-0,90	0,1841	-2,80	0,0026	0,90	0,8159	2,80	0,9974
-0,95	0,1711	-3,00	0,0014	0,95	0,8289	3,00	0,9986
-1,00	0,1587	-3,20	0,0007	1,00	0,8413	3,20	0,9993
-1,05	0,1469	-3,40	0,0003	1,05	0,8531	3,40	0,9997
-1,10	0,1357	-3,60	0,0002	1,10	0,8643	3,60	0,9998
-1,15	0,1251	-3,80	0,0001	1,15	0,8749	3,80	0,9999
-1,20	0,1151			1,20	0,8849		
-1,25	0,1056			1,25	0,8944		

вале. Используя выражения (2.4) и (2.5) или табличные значения интеграла вероятностей, можно определить вероятность нахождения измеряемой величины (или погрешности) в заданном интервале значений. Вероятность нахождения случайной погрешности в конкретном интервале  $(A, B)$  будет определяться выражением

$$\beta = F(B) - F(A), \quad (2.8)$$

где  $F(x)$  — функция распределения случайной величины  $x$ , причем

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

Для нормального закона распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (2.9)$$

Если взять интервал значений в долях от среднего квадратического отклонения  $\sigma$ , то при замене  $\frac{x-m}{\sigma} = t$  выражение (2.9) примет вид

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (2.10)$$

Числовые значения  $\Phi(t)$  приведены в табл. 2.1.

Выражение (2.8) при  $m=0$  и  $\sigma=1$  может быть приведено к виду

$$\beta = \Phi(B) - \Phi(A). \quad (2.11)$$

Например, требуется оценить вероятность того, что измеряемая температура лежит в интервале  $540-550^\circ\text{C}$ . Обработка результатов измерения дала следующие параметры распределения:  $m_t=547^\circ\text{C}$  и  $\sigma=\pm 2,4^\circ\text{C}$ . Определим  $B=(550-547)/2,4=+1,25$  и  $A=(540-547)/2,4=-2,92$ . По табл. 2.1 определяем значения  $\Phi(B)$  и  $\Phi(A)$  и затем  $\beta$ :  $\beta=\Phi(+1,25)-\Phi(-2,92)=0,8944-0,0018=0,8926$ . Таким образом, более 89% всех измеренных значений температуры будет лежать в интервале от  $540$  до  $550^\circ\text{C}$ . На практике часто пользуются симметричными интервалами, кратными  $\sigma$ . Если взять интервал погрешностей  $(-\sigma, +\sigma)$ , или в абсолютных значениях измеряемой величины  $(m-\sigma, m+\sigma)$ , и подсчитать по таблицам интеграл вероятности, то оказывается, что площадь под кривой, ограничиваемая этим интервалом (рис. 2.1), составляет около 68% всей площади. Это значит, что из всех случаев измерения какой-либо величины 68% полученных значений будет отклоняться от наиболее вероятного значения (математического ожидания) измеряемой величины не более чем на  $\pm\sigma$ . Если взять за допустимый интервал отклонения  $\pm 2\sigma$ , то в этом интервале будут находиться уже около 95% всех измеренных значений, т. е. вероятность нахождения результатов измерений в интервале  $\pm 2\sigma$  составляет 0,95. Для интервала  $\pm 3\sigma$  вероятность появления результатов измерений в этом интервале составляет 0,997.

Отсюда возникает понятие *доверительного интервала*. Доверительным называют интервал, в котором с заданной вероятностью находится истинное значение измеряемой величины. Например, для вероятности 0,95 доверитель-

Таблица 2.2. Значения коэффициентов  $t_{\beta}^*$  распределения Стьюдента и  $t_{\beta}^*/\sqrt{n}$

$\beta$	0,683		0,9		0,95		0,997	
	$t_{\beta}^*$	$t_{\beta}^*/\sqrt{n}$	$t_{\beta}^*$	$t_{\beta}^*/\sqrt{n}$	$t_{\beta}^*$	$t_{\beta}^*/\sqrt{n}$	$t_{\beta}^*$	$t_{\beta}^*/\sqrt{n}$
1	1,833	1,296	6,314	4,465	12,71	8,987	234,8	166,0
2	1,283	0,741	2,920	1,686	4,303	2,484	18,72	10,81
3	1,197	0,598	2,353	1,176	3,182	1,591	9,005	4,502
4	1,142	0,511	2,132	0,953	2,776	1,241	6,485	2,900
5	1,110	0,453	2,015	0,823	2,571	1,050	5,404	2,206
6	1,089	0,412	1,943	0,734	2,447	0,925	4,819	1,821
7	1,075	0,380	1,895	0,670	2,365	0,836	4,455	1,575
8	1,066	0,355	1,859	0,620	2,306	0,769	4,209	1,403
9	1,058	0,334	1,833	0,580	2,262	0,715	4,032	1,275
10	1,052	0,317	1,812	0,546	2,228	0,672	3,898	1,175
12	1,042	0,289	1,782	0,494	2,179	0,604	3,711	1,029
14	1,036	0,267	1,761	0,455	2,145	0,554	3,586	0,926
16	1,031	0,250	1,746	0,423	2,120	0,514	3,496	0,848
18	1,027	0,236	1,734	0,398	2,101	0,482	3,430	0,787
20	1,024	0,223	1,725	0,376	2,086	0,455	3,378	0,737
30	1,016	0,182	1,697	0,305	2,042	0,367	3,230	0,580

ный интервал составляет  $\pm 2\sigma$  или для доверительного интервала  $\pm \sigma$  вероятность равна 0,68. В большинстве технических измерений вероятность 0,95 считается достаточной. Отсюда доверительный интервал составляет  $\pm 2\sigma$ .

В общем случае доверительный интервал для нормального закона распределения может быть определен из выражения

$$m_x - \varepsilon_x \leq x \leq m_x + \varepsilon_x, \quad (2.12)$$

или

$$m_x - t_{\beta} \sigma_x \leq x \leq m_x + t_{\beta} \sigma_x, \quad (2.13)$$

где  $\varepsilon_x$  — полуширина доверительного интервала;  $t_{\beta}$  — коэффициент, определенный по интегралу вероятностей для вероятности  $\beta$  (табл. 2.1).

Определим доверительный интервал для  $\beta=0,95$  при измерении давления. По большому числу результатов измерений определены  $m_p = 23,85$  МПа и  $\sigma = 0,13$  МПа. Отсюда границы доверительного интервала составляют

$$(m_p - 2\sigma; m_p + 2\sigma) = (23,85 - 2 \cdot 0,13; 23,85 + 2 \cdot 0,13) = (23,59; 24,11) \text{ МПа.}$$

Все рассмотренные выше выражения справедливы для большого числа однородных измерений, когда имеет место нормальный закон распределения ошибок. Следует заметить, что можно определить с какой-либо вероятностью границы, между которыми будет находиться значение измеряемой величины, но нельзя указать точно это значение. В этом заключается особенность измерения случайных величин. При малом числе измерений для оценки доверительной вероятности и доверительного интервала уже нельзя пользоваться интегралом вероятности. В этом случае следует пользоваться таблицами распределения Стьюдента, в которых устанавливается связь между числом измерений  $n$  и коэффициентом  $t_{\beta}^*$ , определяющим ширину доверительного интервала для различных доверительных вероятностей  $\beta$  (табл. 2.2).

Доверительный интервал для измеряемой величины при малом числе измерений определяется выражением

$$\tilde{m}_x - t_{\beta}^* \tilde{\sigma}_x \leq x \leq \tilde{m}_x + t_{\beta}^* \tilde{\sigma}_x. \quad (2.14)$$

Например, для рассмотренного выше случая измерения давления будем считать, что число измерений равно 5. Определим доверительный интервал для условий, изложенных выше. Определяем  $t_{0,95}^*$  для  $n=5$  по таблице распределения Стьюдента (табл. 2.2).

$$t_{0,95}^* = 2,776.$$

Отсюда границы доверительного интервала составляют  $(23,85 - 2,776 \cdot 0,13; 23,85 + 2,776 \cdot 0,13) = (23,49; 24,21)$  МПа. Из результатов видно, что ширина доверительного интервала для той же вероятности должна быть почти в 1,5 раза больше за счет того, что при меньшем числе измерений доверие к ним меньше.

Лабораторные измерения принципиально отличаются от технических тем, что они, как правило, могут быть повторены, в то время как технические измерения производятся однократно. При лабораторных измерениях имеется возможность провести необходимое количество измерений и затем, проведя статистическую их обработку (как изложено выше), получить оценки и характеристики как результата измерения, так и погрешностей измерений по ГОСТ 8.207-76 или [2].

Повторив несколько раз измерения (наблюдения), получим ряд числовых значений измеряемой величины, которые отличаются один от другого. Но если наблюдения были проведены одинаково тщательно, они заслуживают одинакового доверия. По этим результатам наблюдений определяют приближенное значение (оценку) действительного значения измеряемой величины (результата измерений)  $m$ . Для этого вычисляют оценку среднего арифметического значения результатов наблюдений по формуле (2.2). Далее определяют оценку среднего квадратического отклонения  $\sigma$  при конечном числе измерений  $n$  по формуле (2.7).

На основании полученных значений  $\tilde{m}$  и  $\tilde{\sigma}$  можно вычислить вероятность попадания случайной погрешности в заданный интервал. Для этого задаем границы интервала и по выражению (2.8) с помощью табл. 2.1 определяем вероятность нахождения случайной погрешности в заданном интервале. Таблица 2.1 предусматривает нормальный закон распределения и бесконечно большое число измерений. Таблицей 2.1 можно пользоваться, как правило, когда число измерений более 30. При меньшем числе измерений следует пользоваться табл. 2.2, составленной для распределения Стьюдента.

По результатам наблюдений (статистическим данным) принимается какой-либо закон распределения случайной погрешности и затем определяется соответствие опытного распределения теоретическому. Для этого используются различные критерии согласия. Если опытные данные согласуются с теоретическими, то в дальнейшем для удобства пользуются параметрами теоретического распределения. Однако на практике часто приходится иметь дело с ограниченными статистическими данными — в два-три десятка измерений, а иногда и меньше. Этих данных недостаточно, чтобы найти закон распределения случайной погрешности. Но можно определить по ограниченному материалу ориентировочные значения характеристик случайных погрешностей. В этом случае возникает задача оценки погрешности результата измерений. Требуется оценить, насколько точно определено действительное значение измеряемой величины, его математическое ожидание. В связи с тем что оценка математического ожидания вычисляется на основании конечного числа измерений, оно будет отличаться от действительного значения на  $\Delta_m$ , которая является случайной погрешностью оценки математического ожидания. Это погрешность при увеличении числа измерений стремится к нулю. Дисперсия оценки математического ожидания меньше, чем дисперсия результатов отдельных наблюдений. Среднее квадратическое отклонение оценки математического ожидания (среднего арифметического) может быть определено из выражения

$$\tilde{\sigma}_m = \tilde{\sigma} / \sqrt{n} \quad (2.15)$$

или по результатам наблюдений:

$$\tilde{\sigma}_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n(n-1)}} \quad (2.16)$$

Таким образом, среднее квадратическое отклонение оценки математического ожидания в  $\sqrt{n}$  раз меньше среднего квадратического отклонения результатов отдельных наблюдений. Полученные характеристики случайных погрешностей позволяют определить наиболее вероятное значение результата измерений  $\tilde{m}$  и оценить доверительный интервал, в котором может находиться результат измерения, по формуле

$$\tilde{m} - t_{\beta}^* \tilde{\sigma}_m \leq m \leq \tilde{m} + t_{\beta}^* \tilde{\sigma}_m, \quad (2.17)$$

или

$$\tilde{m} - t_{\beta}^* \tilde{\sigma} / \sqrt{n} \leq m \leq \tilde{m} + t_{\beta}^* \tilde{\sigma} / \sqrt{n}, \quad (2.18)$$

где  $t_{\beta}^*$  — коэффициент распределения Стьюдента (табл. 2.2) для  $n$  измерений при вероятности  $\beta$ .

Более подробно вопросы обработки результатов лабораторных измерений рассмотрены в [2].

### 2.3. Метрологические характеристики средств измерения

В общем виде структурные схемы средств измерения по принципу построения можно разбить на две группы: измерительные схемы прямого преобразования и измерительные схемы с уравниванием сигнала [3]. В средствах измерения, построенных по принципу прямого преобразования, измеряемая величина поступает на первичный преобразователь или на его чувствительный элемент, который является частью измерительной цепи. В измерительной цепи обычно происходит преобразование измеряемой величины в сигнал какого-либо носителя информации (силы тока или напряжения электрического тока, давления сжатого воздуха и др.). Этот сигнал затем усиливается усилителем и подается на отсчетное устройство. В простейшем варианте от этой схемы могут остаться только чувствительный элемент и отсчетное устройство. Схемы прямого преобразования просты, надежны, имеют достаточное быстродействие и, как правило, невысокую стоимость. Однако они практически не могут применяться для измерения сигналов малых энергий.

Дифференциальные преобразователи и измерительные схемы с ними являются одной из разновидностей схем прямого преобразования сигнала.

Структура измерительной схемы с уравниванием сигнала представлена на рис. 2.2. Измеряемая величина  $x$  поступает на первичный преобразователь  $ПП$  или на его чувствительный элемент  $ЧЭ$ , и преобразуется в сигнал  $p_x$ , уравниваемый сигналом  $p_k$  от устройства компенсации  $УК$ . Устройство компенсации  $УК$  преобразует выходной сигнал  $\phi$  в компенсирующий сигнал  $p_k$ . Сигнал небаланса  $\Delta p$  через индикатор рассогласования  $ИР$  подается на вход усилителя  $УС$ . Выходной сигнал усилителя воздействует на интегрирующее устройство (например, реверсивный двигатель), сигнал или положение которого  $\phi$  ве-

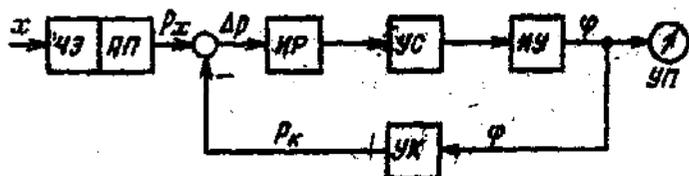


Рис. 2.2. Структурная схема средств измерения с уравниванием сигнала

тается неизменным при отсутствии сигнала с выхода усилителя. Сигнал  $\varphi$  подается на указатель прибора УП и на устройство компенсации УК. Таким образом, выходной сигнал  $\varphi$  будет однозначно определять значение измеряемой величины  $x$ . Приборы с уравниванием сигнала имеют высокую точность, позволяют измерять малые сигналы. Однако быстродействие их меньше, стоимость выше, а надежность ниже, чем у приборов прямого преобразования. Более подробно о свойствах средств измерения с различной структурой изложено в [3].

Сигнал, поступающий на вход средства измерений, называется *входным сигналом средства измерений*, например давление, подводимое к манометру; температура среды для термоэлектрического термометра, погруженного в эту среду. Сигнал, получаемый на выходе средства измерения, называется *выходным сигналом средства измерения*, например показание манометра, отсчитываемое по шкале; значение термо-ЭДС, развиваемой термоэлектрическим термометром. Зависимость выходного сигнала средства измерения от входного сигнала, представленная в виде таблицы, графика или формулы, называется *градуировочной характеристикой средства измерения*. Отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему его изменению измеряемой величины (входного сигнала) называется *чувствительностью измерительного прибора*. Применительно к измерительным преобразователям это отношение называют коэффициентом преобразования (коэффициентом передачи). Абсолютная чувствительность (коэффициент преобразования) определяется формулой

$$S = \Delta l / \Delta x, \quad (2.19)$$

где  $\Delta l$  — изменение сигнала на выходе;  $\Delta x$  — изменение измеряемой величины (входного сигнала).

Под *порогом чувствительности* понимают наименьшее изменение измеряемой величины, способное вызвать изменение показаний измерительного прибора или выходного сигнала преобразователя.

Качество средства измерений, отражающее неизменность во времени его метрологических свойств, называется *стабильностью средств измерения*. Как правило, она характеризуется стабильностью его градуировочной характеристики. Неоднозначность градуировочной характеристики при увеличении и уменьшении измеряемой (входной) величины характеризуется *вариацией*. *Вариацией* называется наибольшая разность между выходными сигналами средства измерения, соответствующими одному и тому же значению входной величины, или наибольшая разность входных сигналов, соответствующих одному и тому же выходному сигналу или показаниям прибора.

Физическая величина, не являющаяся величиной, измеряемой данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений этим средством, называется *влияющей физической величиной*. Условия применения средств измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах нормальной области значений, называются *нормальными условиями* применения средств измерения. Например, для прибора (средства измерений) установлены нормальные значения температуры окружающей среды  $20 \pm 5$  °С. Если температура окружающей среды лежит в этом интервале, то условия применения прибора (средства измерения) называются нормальными. При этом все другие влияющие величины также должны иметь нормальные значения. При нормальных условиях определяется *основная погрешность* средств измерения. Кроме нормальных значений в стандартах или технических условиях на средства измерения устанавливается *рабочая область* значений влияющих величин, в пределах которой нормируется *дополнительная погрешность* этих средств измерения или их изменение показаний (для измерительных приборов). В зависимости от степени защищенности средств измерения от внешних воздействий и устойчивости к механическим воздействиям измерительные приборы и преобразователи под-

разделяются на обыкновенные, виброустойчивые, пылезащищенные, водозащищенные, защищенные от агрессивной среды, взрывобезопасные и т. д. Это дает возможность выбирать средства измерения применительно к условиям работы.

При оценке погрешностей технических измерений большое значение имеют метрологические характеристики средств измерения. Одной из таких характеристик является класс точности. *Классом точности* называется обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность. Однако класс точности не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых данным средством. Например, для измерительного прибора класса точности 1,5 предел допускаемой основной погрешности составляет  $\pm 1,5\%$  диапазона измерения прибора, а действительное значение основной погрешности конкретного прибора может иметь значение, равное или меньшее 1,5%. Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей средств измерений для каждого из классов точности должны устанавливаться в виде абсолютных приведенных или относительных погрешностей (ГОСТ 8.401-80).

Абсолютная погрешность  $\Delta$  может быть выражена одним значением  $\pm a$  или в виде зависимости предела допускаемой погрешности  $\Delta$  от номинального значения, показания или сигнала  $x$ , выраженной формулой

$$\Delta = \pm (a + bx),$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные величины.

Приведенная погрешность определяется формулой

$$\gamma = \pm 100 \Delta/x_N,$$

где  $\gamma$  — предел допускаемой приведенной погрешности в процентах от нормирующего значения;  $x_N$  — нормирующее значение.

Нормирующее значение для технических средств измерения принимается равным диапазону измерения. В отдельных случаях, например при измерении концентрации, устанавливается свое нормирующее значение, ука-

занное в соответствующих стандартах.

Пределы допускаемых дополнительных погрешностей, вызываемых действием отдельных величин, устанавливаются либо указанием конкретных значений для рабочей области значений влияющих величин, либо указанием функциональной зависимости допускаемой дополнительной погрешности от изменения влияющей величины.

В соответствии с ГОСТ 8.009-72\* установлен перечень нормируемых метрологических характеристик средств измерения, который обязывает применять более представительные. Этот ГОСТ предусматривает применение вероятностно-статистических характеристик. Кроме характеристик суммарной погрешности средств измерения  $\Delta$  указываются также характеристики систематической и случайной составляющих погрешности. Для систематической составляющей устанавливается предел допускаемого значения  $\Delta_{сд}$  либо кроме  $\Delta_{сд}$  указывается значение математического ожидания  $M[\Delta_c]$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma(\Delta_c)$  для систематической составляющей погрешности средств измерения данного типа. Для случайной составляющей погрешности устанавливается предел допускаемого значения среднеквадратического отклонения  $\sigma_d(\Delta)$  либо другие характеристики.

Для погрешности средств измерения устанавливается либо предел допускаемого значения  $\Delta$ , так же как и в ГОСТ 8.401-80, либо кроме предела устанавливается математическое ожидание  $M[\Delta]$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma(\Delta)$  погрешности средств измерения данного типа.

Предусматривается также представление функций распределения систематической и случайной составляющих погрешности средств измерения в виде формул, таблиц, графиков или стандартных аппроксимаций. Кроме характеристик основной погрешности устанавливаются функции влияния или пределы допускаемых изменений для каждого влияющего фактора отдельно.

Новый способ нормирования метрологических характеристик средств измерения позволяет получать наиболее вероятные значения результатов измерения и оценки погрешности, близкие к действительному значению.

## 2.4. Оценка погрешностей измерительных систем при технических измерениях

При технических измерениях, как правило, применяются измерительные цепи или системы, состоящие из нескольких средств измерения. Поэтому при оценке погрешностей измерения необходимо оценить погрешности измерительной системы. В общем виде измерительная система может быть представлена как последовательно соединенные первичный измерительный преобразователь, линия связи (или промежуточный преобразователь) и вторичный измерительный прибор (или аналого-цифровой преобразователь перед входом в вычислительное устройство или машину).

Градуировочная характеристика каждого из преобразователей измерительной системы имеет вид  $x_{\text{вых}} = f(x_{\text{вх}})$ . В частном случае она может иметь вид  $x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}$ , где  $k$  — коэффициент преобразования.

Каждый из преобразователей преобразует входной сигнал  $x_{\text{вх}}$  в выходной  $x_{\text{вых}}$  с какой-то погрешностью  $\Delta$ , причем эту погрешность  $\Delta$  можно представить как состоящую из систематической  $\Delta_c$  и случайной  $\dot{\Delta}$  составляющих. Систематическая составляющая может быть охарактеризована ее математическим ожиданием  $M[\Delta_c]$ , а случайная — средним квадратическим отклонением  $\sigma(\dot{\Delta})$ .

Существуют два метода оценки погрешностей измерительной системы. В первом методе производится оценка пределов погрешностей измерительной системы по пределам допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, входящих в систему, определяемым их классом точности, т. е. фактически производится оценка погрешности сверху, определяется максимальное значение погрешности системы. Эта допустимая погрешность измерительной системы оценивается как корень квадратный из суммы квадратов пределов допустимых значений погрешностей [4]:

$$\gamma_{\text{н.с}} = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \dots + \gamma_n^2}. \quad (2.20)$$

Этот способ достаточно строг, если предельные погрешности  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  независимы и их значения соответствуют одинаковым доверительным вероятностям при однопипных законах распределения. В остальных случаях применение выражения (2.20) может быть некорректно.

Второй вероятностно-статистический метод оценки погрешностей достаточно сложен, но он является более строгим и корректным, позволяющим учесть особенности погрешностей отдельных средств измерения и измерительных систем. Этот метод позволяет получить наиболее вероятное значение измерительного параметра и оценки погрешностей, близкие к действительным значениям. Для реализации этого метода должны быть известны или определены в результате соответствующих испытаний статистические характеристики систематической и случайной составляющих или самой погрешности для типа средства измерения, т. е. для множества идентичных средств измерения. Математическое ожидание погрешности для типа средств измерений при нормальных условиях может быть определено как математическое

ожидание систематической составляющей погрешности

$$M[\Delta] = M[\Delta_c]. \quad (2.21)$$

Если условия эксплуатации средств измерения отличаются от нормальных, то

$$M[\Delta] = M[\Delta_c] + \Psi_M(\xi), \quad (2.22)$$

где  $\Psi(\xi)$  — функция влияния на измеряемую данным средством измерения физической величины  $\xi$  на результаты измерения.

Среднее квадратическое отклонение суммарной погрешности определяется по среднему квадратическому отклонению случайной погрешности с учетом соответствующей функции влияния:

$$\sigma(\Delta) = \sigma(\dot{\Delta}) + \Psi_\sigma(\xi). \quad (2.23)$$

При расчете погрешностей измерительных систем, как правило, следует учитывать влияние случайных и систематических составляющих погрешностей средств измерений, входящих в систему. Если математические ожидания случайных составляющих либо равны нулю, либо вошли в математическое ожидание системы как систематические составляющие системы и если коэффициенты преобразования средств измерения равны 1, то математическое ожидание погрешности системы, состоящей из нескольких последовательно включенных средств измерений, будет равно сумме систематических составляющих погрешностей отдельных средств измерения:

$$M[\Delta_{\text{н.с}}] = \Delta_{1c} + \Delta_{2c} + \dots + \Delta_{nc}. \quad (2.24)$$

Если случайные погрешности статистически независимы, то их дисперсия для измерительной системы определяется как сумма дисперсий случайных составляющих средств измерения:

$$D[\dot{\Delta}_{\text{н.с}}] = D[\dot{\Delta}_{1c} + \dot{\Delta}_{2c} + \dots + \dot{\Delta}_{nc} + \dot{\Delta}_1 + \dot{\Delta}_2 + \dots + \dot{\Delta}_n] = D[\dot{\Delta}_1] + D[\dot{\Delta}_2] + \dots + D[\dot{\Delta}_n]. \quad (2.25)$$

Среднее квадратическое отклонение измерительной системы определяется формулой

$$\sigma(\dot{\Delta}_{\text{н.с}}) = \sqrt{D[\dot{\Delta}_{\text{н.с}}]} = \sqrt{\sum_{i=1}^n D[\dot{\Delta}_i]}. \quad (2.26)$$

В практике технических и лабораторных измерений часто встречаются косвенные измерения, когда определяемый параметр является функцией нескольких аргументов:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (2.27)$$

Аргументы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  определяются в результате прямых измерений, и каждый из этих аргументов имеет свою составляющую погрешности. Погрешность косвенных измерений параметра  $y$  зависит как от систематических, так и от случайных составляющих погрешностей аргументов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Систематическая составляющая погрешности измерения параметра  $y$  может быть оценена по известным значениям систематических составляющих погрешностей аргументов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , или в результате измерений могут быть введены поправки, позволяющие исключить систематическую составляющую погрешности. Тогда математическое ожидание (наиболее вероятное значение)

измеряемого параметра  $y$  может быть определено по (2.27):

$$m_y = f(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}), \quad (2.28)$$

где  $m_{x_i} = x_i + \delta_{x_i}$ ;

$$m_{x_2} = x_2 + \delta_{x_2};$$

.....

$$m_{x_n} = x_n + \delta_{x_n};$$

$x_1, x_2, \dots, x_n$  — значения намеряемых аргументов;  $\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_n}$  — поправки, позволяющие исключить систематические составляющие погрешностей.

Случайная составляющая погрешности косвенного измерения параметра  $y$  может быть определена только в том случае, если функция (2.27) может быть линеаризована с достаточной точностью в диапазоне возможных значений аргументов  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и если эти аргумен-

ты независимы. Тогда среднее квадратическое отклонение измеряемого параметра можно определить из выражения

$$\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2}. \quad (2.29)$$

Следует заметить, что изложенным выше методом можно найти математическое ожидание результата косвенного измерения определяемого параметра  $y$  и оценить его случайную погрешность измерения, если выполняются указанные выше условия. Однако закон распределения случайной погрешности параметра  $y$  обычно неизвестен, поэтому делать какие-либо выводы о вероятности появления погрешностей и о доверительных интервалах не представляется возможным.

## Раздел второй

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

### Глава третья

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУР И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ШКАЛАХ

### 3.1. Общие сведения о температуре

Температура — величина, которая характеризует степень нагрева тела. Зависимость между средней кинетической энергией поступательно движущихся молекул и температурой идеального газа определяется выражением [5]

$$E = (3/2) kT, \quad (3.1)$$

где  $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup> — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура тела, К.

Если тела имеют разную температуру, то при их контакте происходит выравнивание энергий: тело, имеющее более высокую температуру, а значит, большую среднюю кинетическую энергию молекул, передает свою теплоту (энергию) телу, имеющему меньшую температуру, а значит, и меньшую среднюю кинетическую энергию молекул. Таким образом, температура является параметром, характеризующим как качественную, так и количественную сторону процессов теплообмена, теплопереноса. Однако измерить температуру непосредственно нельзя; можно определить ее значение только по каким-то другим физическим параметрам тела, которые изменяются однозначно в зависимости от температуры. Такими параметрами, зависящими от температуры, являются, например, объем, длина, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущая сила, энергетическая яркость излучения и ряд других.

Впервые прибор для измерения температуры был предложен в 1598 г. Галилеем. Затем М. В. Ломоносовым, Фаренгейтом были разработаны термометры, появились шкалы Реомюра и Цельсия. Все эти температурные шкалы строились следующим образом. Выбирались две опорные (или реперные) точки. Как правило, для этого брались точки фазового равновесия чистых веществ. Изменение термомет-

рического свойства в интервале между реперными точками аппроксимировалось линейной зависимостью от температуры:

$$T = T_0 + kC, \quad (3.2)$$

где  $T_0$  — значение температуры в одной из реперных точек;  $C$  — значение термометрического свойства при температуре  $T$ ;  $k$  — коэффициент пропорциональности, определенный по значениям термометрических свойств и температур в реперных точках.

В процессе исследований выяснилось, что температурные шкалы, построенные на одних и тех же реперных точках, но использовавшие различные термометрические вещества, давали различные значения температуры. Это объясняется тем, что термометрические свойства веществ по-разному изменяются с температурой, причем все эти зависимости нелинейны. В связи с этим возникла проблема создания температурной шкалы, которая не зависела от термометрических свойств веществ. Такая шкала была предложена в 1848 г. Кельвиным и называлась термодинамической. В основу построения термодинамической шкалы Кельвин взял идеальный цикл Карно, в котором работа, полученная в этом цикле, зависит только от температур начала и конца процесса. Таким образом, термодинамическая шкала, предложенная Кельвиным, не зависела от термометрических свойств, однако для практического измерения температуры она была неудобна: нужно было либо измерять количество теплоты, либо при использовании термометров, заполненных реальными газами, вводить для каждого значения температуры различные поправки.

### 3.2. Практические температурные шкалы

В настоящее время применяется Международная практическая температурная шкала (МПТШ) редакции 1968 г. Согласно МПТШ-68

основой температурой является термодинамическая температура  $T$ , единица которой кельвин (К) —  $1/273,16$  часть термодинамической температуры равновесия между твердой, жидкой и газообразной фазами воды (тройная точка воды). Температура Цельсия  $t$  определяется из выражения

$$t = T - T_0, \quad (3.3)$$

где  $T_0 = 273,15$  К. Единица, применяемая для выражения температуры Цельсия, — градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ), равный кельвину. Разность тем-

Таким образом, МПШ-68 построена на постоянных температурных точках, которые могут быть воспроизведены с необходимой точностью. Численные значения температур в этих постоянных точках определены на специальных установках эталонными средствами измерения по термодинамической шкале. Значения температур между постоянными точками определяются с помощью эталонных средств измерения по интерполяционным формулам. По эталонным средствам измерения градуируются образцовые средства измерения, а по образцовым градуируются рабочие средства измере-

Таблица 3.1. Основные постоянные точки МПШ-68

Состояние равновесия	Присвоенные значения температуры по термодинамической шкале	
	$T$ , К	$t$ , $^{\circ}\text{C}$
Равновесие между твердой, жидкой и газообразной фазами водорода (тройная точка водорода)	13,81	-259,34
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода при давлении 33 330,6 Па (25/76 нормального атмосферного давления)	17,042	-256,108
Равновесие между жидкой и газообразной фазами водорода (точка кипения водорода)	20,28	-252,87
Равновесие между жидкой и газообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102	-246,048
Равновесие между твердой, жидкой и газообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	-218,789
Равновесие между жидкой и газообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188	-182,962
Равновесие между твердой, жидкой и газообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16	0,01
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды)	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58	1064,43

ператур выражают как в кельвинах, так и в градусах Цельсия. МПШ-68 выбрана таким образом, чтобы температура, измеренная по этой шкале, была близка к термодинамической температуре с точностью, обеспечиваемой современными средствами измерений. МПШ-68 основана на значениях температур, присвоенных 11 воспроизводимым состояниям равновесия (основные постоянные точки), и на специально аттестованных интерполяционных приборах. Интерполяция между температурами постоянных точек производится по формулам, служащим для установления связи между показаниями этих приборов и значениями международной практической температуры.

Основные постоянные точки воспроизводят, осуществляя состояние равновесия между фазами чистых веществ. В табл. 3.1 приведены состояния равновесия и присвоенные им значения температуры, определенные по термодинамической шкале.

МПШ-68 позволяет определять температуру рабочими средствами измерения по термодинамической шкале с погрешностью, определяемой методом измерения. МПШ-68 обеспечивает измерение температур в интервале от 13,81 до 6300 К (ГОСТ 8.157-75).

В качестве эталонного средства измерения для области температур от 13,81 до 903,89 К ( $630,74^{\circ}\text{C}$ ) применяют термометр сопротивления, изготовленный из платиновой проволоки. Для области температур от 630,74 до  $1064,43^{\circ}\text{C}$  в качестве эталонного применяется платинородий-платиновый термоэлектрический термометр. Для области температур от  $1337,58^{\circ}\text{C}$  (1064,3  $^{\circ}\text{C}$ ) до 6300 К применяется квазихромотический пирометр.

В СССР кроме МПШ-68 установлены практические температурные шкалы (ГОСТ 8.157-75), которые предназначены для осуществления единообразных измерений температуры в диапазоне от 0,01 до 100 000 К.

Для диапазона 0,01—0,8 К установлена температурная шкала термометра магнитной восприимчивости (ТШТМВ), основанная на зависимости магнитной восприимчивости термометра из церий-магниевого нитрата от температуры.

В диапазоне от 0,8 до 1,5 К установлена шкала конденсационного термометра <sup>3</sup>He 1962 г., основанная на зависимости давления насыщенных паров изотопа гелия-3 от температуры.

В диапазоне от 1,5 до 4,2 К применяется

### 3.3. Средства измерения температуры

В настоящее время в различных отраслях науки и в промышленности применяются десятки различных способов измерения температуры (ГОСТ 13417-76). В табл. 3.2 приведены наиболее распространенные в промышленности средства измерения температуры и указаны пределы применения

Таблица 3.2. Пределы применения промышленных средств измерения температуры

Тип средства измерения	Разновидность средства измерения	Предел длительного применения, °С	
		нижний	верхний
Термометры расширения	Жидкостные стеклянные термометры	—200	600
	Манометрические термометры	—200 (—272)	1000
Термометры сопротивления	Металлические (проводниковые) термометры сопротивления	—260	1100
	Полупроводниковые термометры сопротивления	—272	600
Термоэлектрические термометры	Термоэлектрические термометры	—200 (—270)	2200 (2800)
Пирометры	Квазимонохроматические пирометры	700	6000 (100 000)
	Пирометры спектрального отношения	300	2800
	Пирометры полного излучения	—50	3500

шкала конденсационного термометра <sup>4</sup>He 1958 г., основанная на зависимости давления насыщенных паров изотопа гелия-4 от температуры.

Температурная шкала германиевого термометра электрического сопротивления (ТШГТС) основана на зависимости сопротивления германиевого термометра от температуры  $T$  и установлена для диапазона температур от 4,2 до до 13,81 К.

Температурная шкала пирометра микроволнового излучения (ТШПМИ) основана на зависимости спектральной плотности энергии излучения  $L(T)$  черного тела от температуры  $T$  в микроволновом диапазоне излучения и установлена для диапазона от 6300 до 100 000 К.

серийных средств измерения. В скобках указаны пределы применения средств измерения для специальных целей. Средство измерений температуры, предназначенное для выработки сигнала в форме, удобной для восприятия наблюдателем, автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления, называется *термометром*.

Средство измерения температуры по тепловому электромагнитному излучению называется *пирометром*. Пирометры применяются для бесконтактного измерения температуры.

## ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

## 4.1. Стеклянные жидкостные термометры

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основан на расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре, в зависимости от температуры. Стеклянные термометры по своей конструкции бывают палочные и с вложенной шкалой. Стеклянный термометр с вложенной шкалой состоит из стеклянного резервуара 1 и припаянного к нему стеклянного капилляра 2 (рис. 4.1, а). Вдоль капилляра расположена шкала 3, которая, как правило, наносится на пластине молочного стекла. Резервуар, капилляр и шкала помещаются в стеклянную оболочку 4, которая припаяется к резервуару. Палочные стеклянные термометры изготавливаются из толстостенных капилляров 1, к которым припаявается резервуар 2. Шкала термометра 3 наносится на наружной поверхности капилляра (рис. 4.1, б).

Температура измеряемой среды, в которую помещены резервуар и часть капилляра, определяется по изменению объема термометрической жидкости, отсчитываемому по положению уровня жидкости в капилляре, которое отградуировано в градусах Цельсия. В связи с тем что одновременно с расширением термометрической жидкости происходит также расширение резервуара и капилляра, фактически мы судим о температуре не по изменению объема жидкости, а по видимому изменению объема термометрической жидкости в стекле. Поэтому видимое расширение жидкости несколько меньше действительного. В табл. 4.1 приведены некоторые термометрические жидкости и их характеристики.

Таблица 4.1. Термометрические жидкости

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

Среди жидкостных термометров наибольшее распространение получили ртутные стеклянные термометры. Химически чистая ртуть как термометрическое вещество имеет ряд достоинств: она остается жидкостью в широком интервале температур, не смачивает стекло, легко может быть получена в чистом виде. Однако ртуть имеет относительно малый температурный коэффициент объемного расширения, что требует изготовления термометров с тонкими капиллярами. Нижний предел измерения ртутных термометров  $-35^\circ\text{C}$  определяется температурой затвердевания ртути. Верхний предел

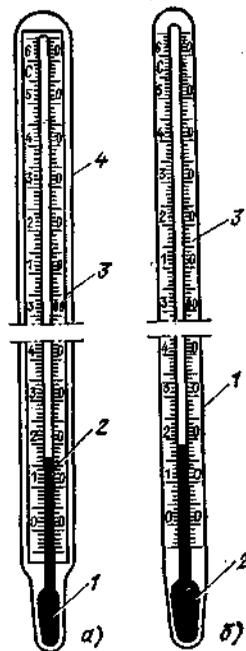


Рис. 4.1. Лабораторные ртутные термометры: а — палочный; б — с вложенной шкалой

измерения  $+600^{\circ}\text{C}$  в области наиболее высокими характеристиками стекла. В связи с тем что температура кипения ртути при атмосферном давлении значительно меньше верхнего предела применения ртутных термометров, в термометрах, предназначенных для измерения высоких температур, капилляр над ртутью заполняется инертным газом, например азотом. При этом для исключения образования паров ртути в капилляре давление газа должно быть тем больше, чем выше верхний предел измерения. Для термометров с верхним пределом измерения  $600^{\circ}\text{C}$  давление газа над ртутью превышает 3 МПа (30 кгс/см<sup>2</sup>).

Стекланные термометры с органическими термометрическими жидкостями применяются в интервале температур от  $-200$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ . Однако эти жидкости смачивают стекло и поэтому требуют применения капилляров с относительно большим диаметром канала.

К достоинствам стеклянных жидкостных термометров относятся высокая точность измерения, простота и дешевизна. Недостатками стеклянных термометров являются относительно плохая видимость шкалы, практическая невозможность передачи показаний на расстояние и, следовательно, невозможность автоматической регистрации показаний, а также невозможность ремонта термометров.

В зависимости от области применения по методике градуировки термометры делятся на две группы: термометры, градуируемые при полном погружении, и термометры, градуируемые при неполном погружении (как правило, при определенной длине погружения нижней части). Термометры первой группы применяются, как правило, в лабораторных условиях и позволяют обеспечить более высокую точность. Глубина их погружения должна изменяться при изменении температуры. Термометры второй группы — технические — применяются для измерения температур в промышленности; глубина их погружения должна быть постоянной. В связи с этим конструктивно технические термометры выполнены таким образом, что диаметр их нижней («хвостовой») части существенно меньше диаметра их верхней части, в которой расположена шкала. Эти термометры погружаются в изме-

ряемую среду на глубину нижней части. Различие в градуировке и применении стеклянных термометров вызвано тем, что при измерении температуры могут иметь место систематические погрешности, характерные для данного средства измерения. Одной из них является погрешность за счет выступающего столбика термометра. Если термометр градуировался при полном его погружении в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки, а на практике он не был погружен до этой отметки и часть столбика термометрического вещества находилась вне измеряемой среды, выступала из нее, то может иметь место погрешность за счет выступающего столбика. Эта погрешность существует, когда температура выступающей части столбика термометрической жидкости и части, погруженной в измеряемую среду, будет различной, а значит, будет различным и расширение погруженной и выступающей частей жидкости. Поправка на выступающий столбик к показаниям термометра может быть определена в градусах из выражения

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

где  $n$  — число градусов в выступающем столбике,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\gamma$  — видимый температурный коэффициент объемного расширения термометрической жидкости в стекле,  $\text{K}^{-1} (^{\circ}\text{C}^{-1})$ ;  $t$  — температура, показываемая термометром,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{в.с}$  — средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром,  $^{\circ}\text{C}$ .

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

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

где  $t_{в.с.град}$  — температура выступающего столбика при градуировке,  $^{\circ}\text{C}$  (обычно  $t_{в.с.град} = 20^{\circ}\text{C}$ ).

Следует отметить, что погрешность за счет выступающего столбика у ртути примерно на порядок меньше, чем у органических термометрических жидкостей, за счет существенного разли-

чия значений температурного коэффициента расширения.

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

В настоящее время выпускаются следующие разновидности стеклянных термометров.

1. Технические ртутные термометры с вложенной шкалой прямые (рис. 4.2, а) и угловые (рис. 4.2, б), выпускаются 11 модификаций со шкалами  $-90 \div +30$ ;  $-60 \div +50$ ;  $-30 \div +50$ ;  $0-100$ ;  $0-160$ ;  $0-200$ ;  $0-300$ ;  $0-350$ ;  $0-450$ ;  $0-500$  и  $0-600^{\circ}\text{C}$ . Цена деле-

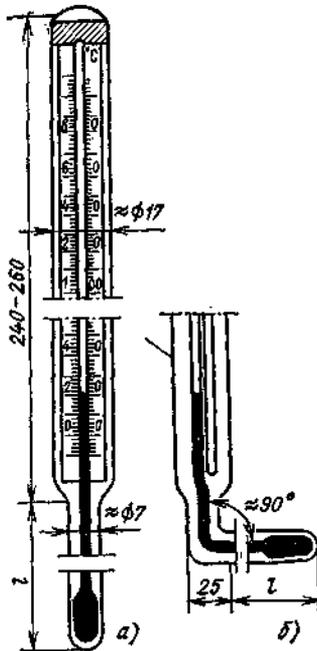


Рис. 4.2. Технические стеклянные термометры: а — прямой; б — угловой

ния шкалы составляет от  $0,5^{\circ}\text{C}$  (шкала  $-30 \div +50^{\circ}\text{C}$ ) до 5 и  $10^{\circ}\text{C}$  (шкала  $0-600^{\circ}\text{C}$ ).

2. Лабораторные ртутные термометры палочные (рис. 4.1, б) и с вложенной шкалой (рис. 4.1, а) предназначены для измерения температур от  $-30$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ . Эти термометры погружаются в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Термометры подразделяются на четыре группы. Термометры с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$  имеют диапазон измерения  $55^{\circ}\text{C}$  (например,  $0-55^{\circ}\text{C}$  или  $200-255^{\circ}\text{C}$ ) с верхним пределом измерения не более  $305^{\circ}\text{C}$ . Для больших диапазонов измерения  $0-500^{\circ}\text{C}$ ,  $0-600^{\circ}\text{C}$  цена деления шкалы  $2^{\circ}\text{C}$ .

3. Жидкостные (не ртутные) термометры (ГОСТ 9177-74) выпускаются палочные, с вложенной шкалой и с наружной шкальной пластиной на пределы измерения от  $-200$  до  $+200^{\circ}\text{C}$  с ценой деления от  $0,2$  до  $5^{\circ}\text{C}$ .

4. Термометры ртутные повышенной точности и образцовые (ГОСТ 13646-68) выпускаются с узкими диапазонами измерения (от  $4$  до  $50^{\circ}\text{C}$ ) и с ценой деления от  $0,01$  до  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

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

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

Допускаемые погрешности технических термометров не должны превышать деления шкалы. Например, при цене деления  $0,5^{\circ}\text{C}$  предел допускаемой погрешности составляет  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , а при цене деления  $10^{\circ}\text{C}$  предел составляет  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ . Для других разновидностей термометров пределы допускаемых погрешностей определяются техническими требованиями, причем они могут быть больше цены деления. Например, для лабораторных термометров с ценой деления  $0,5^{\circ}\text{C}$  предел допускаемой погрешности составляет  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , а для образцовых термометров с ценой деления

0,01 °С предел допускаемой погрешности составляет  $\pm 0,05$  °С.

Стеклянные термометры являются одним из наиболее точных средств измерения температуры.

#### 4.2. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления термометрического вещества в герметически замкнутом объеме от температуры. Термосистема манометрического термометра (рис. 4.3) состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины, один конец которой соединен с капилляром, а другой, запаянный конец пружины соединен со стрелкой измерительного прибора 3.

Манометрические термометры в зависимости от вида рабочего (термометрического) вещества, заполняющего термосистему, подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные. Манометрические термометры изготавливаются для измерения температур от  $-200$  до  $+600$  °С, конкретные диапазоны измерения определяются заполнителем термосистемы. Термометры со специальным заполнителем применяются для измерения температур от  $100$  до  $1000$  °С (ГОСТ 8624-80).

Термобаллон термометра погружается в измеряемую среду, и рабочее вещество, находящееся в термобаллоне, принимает температуру измеряемой среды. При этом в термосистеме устанавливается давление, определяемое температурой измеряемой среды. При повышении температуры давление повышается, при уменьшении температуры понижается. Изменение давления рабочего вещества через гибкий капилляр передается на измеритель-

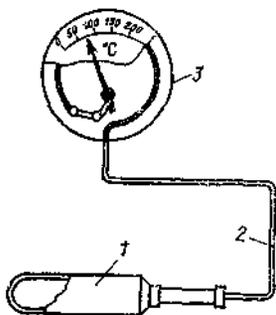


Рис. 4.3. Манометрический термометр

ный прибор, являющийся частью манометрического термометра. Измерительный прибор является пружинным манометром, рассчитанным на те диапазоны измерения давления, которые имеют место в термосистемах манометрических термометров.

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

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

где  $p_t$  и  $p_0$  — давление газа при температурах  $t$  и  $0$  °С;  $\beta$  — температурный коэффициент расширения газа,  $\beta = 1/273$ , или  $0,00366$  К $^{-1}$ .

Уравнение шкалы газового манометрического термометра будет также линейным:

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

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

В связи с тем что при изменении температуры за счет теплового расширения изменяется объем термобаллона, а также изменяется с давлением внутренний объем манометрической пружины, объем термосистемы не постоянен. Поэтому реальное уравнение шкалы несколько отличается от линейного (4.4). Однако это отклонение незначительно и можно считать, что шкалы газовых манометрических термометров являются равномерными. Диапазон изменения рабочего давления в термосистеме может быть увеличен путем увеличения начального давления азота в термосистеме. Это позволяет унифицировать манометрические пружины, а также уменьшает барометрическую погрешность манометрического термометра. Пружинные манометры измеряют избыточное давление, и поэтому изменение барометрического давления может вызвать изменение их показаний. Если измеряемое давление будет значительным, то колебания барометрического давления практически не будут влиять на показания прибора.

Изменение температуры окружающего воздуха будет влиять на расши-

рение рабочего вещества в капилляре и манометрической пружине, что будет вызывать изменение давления в термосистеме и соответствующее изменение показаний термометра. Для уменьшения этого влияния стремятся уменьшить отношение внутреннего объема пружины и капилляра к объему термобаллона. Для этого увеличивают длину термобаллона или его диаметр. Длина термобаллона газового манометрического термометра не должна превышать 400 мм, а диаметр термобаллона выбирается из ряда 5, 8, 10, 12, 16, 20, 25 и 30 мм (ГОСТ 8624-80). Длина капилляра может составлять от 0,6 до 60 м. Для уменьшения температурной погрешности в некоторых измерительных приборах внутри устанавливают термокомпенсаторы. Специально изготовленные газовые манометрические термометры могут применяться и для измерения температур более низких, чем 0 °С. Например, водородный газовый термометр может применяться до -250 °С, а гелиевый — до -267 °С.

*Жидкостные манометрические термометры* предназначены для измерения температуры от -150 до +300 °С. В качестве рабочего вещества, заполняющего термосистему, применяют ртуть, пропиловый спирт, метаксилон и другие жидкости. Рабочее вещество жидкостных манометрических термометров практически несжимаемо. Поэтому изменение объема рабочей жидкости в термобаллоне при изменении температуры на величину, соответствующую диапазону измерения, вызовет такое увеличение давления в термосистеме, при котором манометрическая пружина изменит свой внутренний объем на величину изменения объема жидкости. Давление, при котором это будет иметь место, зависит от жесткости пружины и для различных манометрических пружин может быть различным.

В жидкостных манометрических термометрах погрешность, вызванная изменением барометрического давления, как правило, отсутствует, так как давление в системе значительно. Погрешность, вызываемая изменением температуры окружающей среды, имеет место и в жидкостных манометрических термометрах. Для ее уменьшения применяют те же способы, что и в газовых манометрических термометрах:

уменьшают относительный объем жидкости, находящейся при температуре окружающей среды, уменьшая внутренний объем термокапилляра и пружины, или внутрь измерительного прибора встраивают специальные термокомпенсаторы погрешности.

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

*Конденсационные манометрические термометры* предназначены для измерения температур от -50 до +300 °С. Термобаллон термометра примерно на  $\frac{3}{4}$  заполнен низкокипящей жидкостью, а остальная часть заполнена насыщенным паром этой жидкости. Количество жидкости в термобаллоне должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар. В качестве рабочей жидкости применяются фреон-22, пропилен, хлористый метил, ацетон и этилбензол. Капилляр и манометрическая пружина заполняются, как правило, другой жидкостью. Давление в термосистеме конденсационного манометрического термометра будет равно давлению насыщенного пара рабочей жидкости, определяемому в свою очередь температурой, при которой находится рабочая жидкость, т. е. температурой измеряемой среды с помещенным в нее термобаллоном. Эта зависимость давления насыщения пара от температуры имеет нелинейный вид, она однозначная, когда измеряемая температура не превышает критическую.

В связи с тем что давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры, на показания термометра не будет оказывать влияние температура окружающей среды. Практически небольшая погрешность за счет механизма передачи внутри манометра будет иметь место, но сам принцип измерения обеспечивает независимость от температуры окружающей среды. Гидростатическая погрешность вызывается разностью высот расположения

термобаллона и измерительного прибора, причем эта погрешность будет зависеть от показаний прибора: в начале шкалы она будет больше, а в конце — меньше. Длина капилляра для уменьшения этой погрешности не превышает 25 м. Барометрическая погрешность у конденсационных манометрических термометров может иметь место на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико. В остальных случаях влияние давления будет пренебрежимо мало.

Специально изготовленные конденсационные манометрические термометры применяются для измерения сверхнизких температур. Конденсационные термометры, заполненные ге-

лием, используются для измерения температур от 0,8 К.

Манометрические термометры отличаются простотой устройства, возможностью дистанционной передачи показаний и автоматической записи. Одним из важных преимуществ является возможность их использования в пожаро- и взрывоопасных помещениях. К недостаткам относится трудность ремонта при разгерметизации системы, ограниченное расстояние дистанционной передачи показаний и во многих случаях большие размеры термобаллона. Газовые и жидкостные манометрические термометры имеют класс точности 1; 1,5 и 2,5, конденсационные — 1,5; 2,5 и 4.

## Глава пятая

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

#### 5.1. Основы теории, термоэлектрические цепи

Применение термоэлектрических термометров для измерения температуры основано на зависимости термоэлектродвижущей силы термопары от температуры. Термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников при неравенстве температур в местах соединения этих проводников (рис. 5.1). Современная физика объясняет термоэлектрические явления следующим образом. С одной стороны, вследствие различия уровней Ферми у различных металлов при их соприкосновении возникает контактная разность потенциалов. С другой стороны, концентрация свободных электронов в металле зависит от температуры. При наличии разности температур в проводнике возникает диффузия электронов, приводящая к образованию электрического поля. Таким образом, термоэлектродвижущая сила складывается из суммы скачков потенциала в контактах (спаях) термопары и суммы изменений потенциала, вызванных диффузией электронов, и зависит от рода проводников и их температуры.

Если в цепи (рис. 5.1) температуры мест соединения проводников  $a$  и  $b$  будут одинаковы и равны  $t$ , то и разно-

сти потенциалов будут равны по значению, но иметь разные знаки:

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

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

$$E_{ab}(t, t) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t) = 0. \quad (5.1)$$

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

$$E_{ab}(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0) \neq 0, \quad (5.2)$$

так как разности потенциалов для одних и тех же проводников при разных температурах не равны:  $e_{ab}(t) \neq e_{ab}(t_0)$ . Результирующая термо-ЭДС (5.2) зависит для данных проводников  $a$  и  $b$  от температур  $t$  и  $t_0$ . Чтобы получить однозначную зависимость термо-ЭДС от измеряемой температуры  $t$ , необходимо другую температуру  $t_0$  поддерживать постоянной.

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

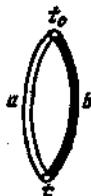


Рис. 5.1. Термоэлектрическая цепь

Для того чтобы выяснить, как влияет включение в цепь термоэлектрического термометра третьего проводника, рассмотрим цепь, составленную из трех различных проводников  $a, b, c$  (рис. 5.2, а). Термо-ЭДС такой цепи при равенстве температур всех мест соединения будет

$$E_{abc}(t) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t) + e_{ca}(t) = 0 \quad (5.3)$$

или

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

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

$$E_{abc}(t, t_0) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t_0) + e_{ca}(t_0). \quad (5.4)$$

Из (5.3) следует, что

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

Тогда (5.4) можно записать так:

$$E(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0), \quad (5.5)$$

т. е. термо-ЭДС цепи, составленной из трех разнородных проводников, не отличается от термо-ЭДС цепи, составленной из двух проводников (5.2), если температура мест подсоединения третьего проводника равна. Из закономерностей включения третьего проводника можно сделать следующие выводы: включение одного, двух или нескольких проводников в цепь термоэлектрического термометра не вызовет искажения термо-ЭДС термометра, если места подсоединения каждого из этих проводников будут иметь одинаковую температуру; рабочий конец термоэлектрического термометра можно изготавливать путем сварки или пайки, если температура во всех точках спаивания будет одинакова.

На основании особенностей включения третьего проводника в цепь термоэлектрического термометра могут быть использованы два варианта включения измерительного прибора

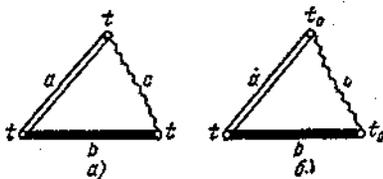


Рис. 5.2. Включение третьего проводника в цепь термометра

ИП в цепь термоэлектрического термометра: в разрыв электрода (рис. 5.3, а) и в разрыв спаивания (рис. 5.3, б). В первом случае измеряемая температура (температура рабочего конца) будет  $t$ , температура свободных концов, поддерживаемая постоянной,  $t_0$  и температуры мест подсоединения третьего проводника с измерительным прибором  $t'_1$  и  $t''_1$ . Чтобы не было искажения развиваемой термо-ЭДС, температуры  $t'_1$  и  $t''_1$  должны быть равны:  $t'_1 = t''_1$ , а температура свободных концов  $t_0 = \text{const}$ . Во втором случае третий проводник с измерительным прибором включается в разрыв свободных концов, поэтому места подсоединения третьего проводника одновременно являются свободными концами термоэлектрического термометра. Эти температуры должны быть одинаковы, как концы третьего проводника, и постоянны, как свободные концы. Если выполнены эти условия, то включение измерительного прибора не искажает термо-ЭДС термометра.

Для измерения температуры термоэлектрическим термометром необходимо измерить термо-ЭДС, развиваемую термометром, и температуру свободных концов. Если температура свободных концов термометра при измерении температуры равна  $0^\circ\text{C}$ , то измеряемая температура определяется сразу из градуировочной характеристики (таблиц, графиков) (рис. 5.4), уста-

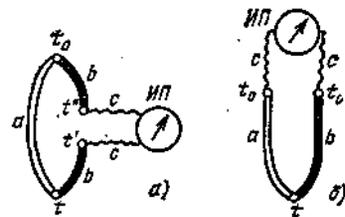


Рис. 5.3. Включение измерительного прибора в цепь термоэлектрического термометра

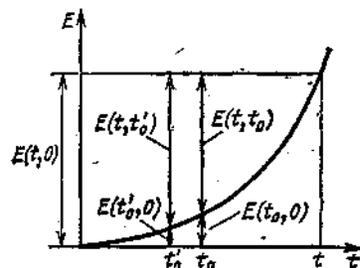


Рис. 5.4. Введение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра

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

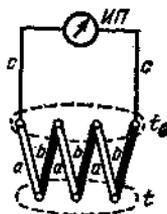


Рис. 5.5. Термобатарея

$E(t_0, 0)$ , чтобы получить значение термо-ЭДС  $E(t, 0)$ :

$$E(t, t_0) + E(t_0, 0) = E(t, 0). \quad (5.6)$$

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

Если в процессе измерения температура свободных концов примет какое-то новое значение  $t'_0$ , то термо-ЭДС, развиваемая термометром, будет  $E(t, t'_0)$  (рис. 5.4) и величина поправки на температуру свободных концов будет  $E(t'_0, 0)$ , а термо-ЭДС, соответствующая условиям градуировки,

$$E(t, t'_0) + E(t'_0, 0) = E(t, 0). \quad (5.7)$$

Значение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра зависит от градуировочной характеристики термометра, определяемой материалами проводников, из которых изготовлен термоэлектрический термометр. Независимо от способа введения поправки (расчетного или автоматического) методика введения поправки остается неизменной: определяется расчетным путем

или автоматически в схеме получается значение  $E(t_0, 0)$ , которое затем суммируется с термо-ЭДС термопары. Суммарная термо-ЭДС  $E(t, 0)$  соответствует градуировочному значению.

Для решения отдельных задач измерений температуры применяются различные способы соединения термоэлектрических термометров. Наиболее распространенные из них — термобатарея и дифференциальная термопара. Для увеличения коэффициента преобразования термоэлектрического термометра применяют последовательное включение нескольких термопар (термобатарею) (рис. 5.5). При этом термо-ЭДС, развиваемая термопарами,

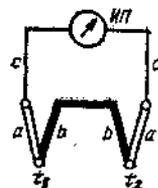


Рис. 5.6. Дифференциальный термоэлектрический термометр

суммируется, т. е. термо-ЭДС термобатареи, состоящей из  $n$  термопар, в  $n$  раз больше термо-ЭДС отдельной термопары. Такое включение применяют для измерений при малых разностях температур рабочего  $t$  и свободного  $t_0$  концов. Однако, как правило, температуры в различных точках расположения рабочих и свободных концов не совсем одинаковы вследствие неоднородности температурных полей. Поэтому термобатарея, увеличивая термо-ЭДС термометра, позволяет уменьшить погрешность измерения термо-ЭДС, но не повышает существенно точности измерения температуры.

В некоторых случаях возникает необходимость измерения разности температур в двух точках. Для этого располагают рабочий спай термопары в одной из точек, а свободные концы — в другой точке (рис. 5.6). В этом случае термо-ЭДС, развиваемая термометром, будет определяться температурами рабочего спая  $t_1$  и свободных концов  $t_2$ :

$$E(t_1, t_2) = e(t_1) - e(t_2). \quad (5.8)$$

Если в интервале температур  $t_1 - t_2$  зависимость термо-ЭДС от температу-

ры может быть аппроксимирована линейной зависимостью, то уравнение (5.8) примет вид

$$E(t_1, t_2) = k(t_1 - t_2). \quad (5.9)$$

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

## 5.2. Устройство термоэлектрических термометров и применяемые материалы

Два любых разнородных проводника могут образовать термоэлектрический термометр. Как же выбрать, какие из проводников могут быть использованы для изготовления термоэлектрических термометров и из каких проводников целесообразнее всего изготавливать термоэлектрические термометры? К материалам, используемым для изготовления термоэлектрических термометров, предъявляется целый ряд требований: жаростойкость, жаропрочность, химическая стойкость, воспроизводимость, стабильность, однозначность и линейность градуировочной характеристики и ряд других. Среди них есть обязательные и желательные требования. К числу обязательных требований относятся стабильность градуировочной характеристики и (для стандартных термометров) воспроизводимость в необходимых количествах материалов, обладающих вполне определенными термоэлектрическими свойствами. Все остальные требования являются желательными. Например, могут быть очень жаропрочные материалы, вос-

производимые с однозначной и линейной градуировочной характеристикой и высоким коэффициентом преобразования. Но если градуировочная характеристика этих материалов нестабильна, то измерять таким термометром нельзя. С другой стороны, материалы, имеющие низкий коэффициент преобразования, нелинейную градуировочную характеристику, но имеющие стабильную характеристику, используются для термоэлектрических термометров.

В соответствии со стандартами СЭВ (СТ СЭВ 1059-78) в СССР будут применяться следующие стандартные термоэлектрические термометры, характеристики которых приведены в табл. 5.1 и 5.2.

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

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

Таблица 5.1. Стандартные термоэлектрические термометры

Тип термопары термоэлектрического термометра	Обозначение новое (старое)	Рабочий диапазон длительного режима работы, °С	Максимальная температура кратковременного режима работы, °С
Медь-копелевая	—	—200 ÷ +100	—
Медь-медноникелевая	T	—200 ÷ +400	—
Железо-медноникелевая	J	—200 ÷ +700	900
Хромель-копелевая	(XK)	—50 ÷ +600	800
Никельхром-медноникелевая	E	—100 ÷ +700	900
Никельхром-никельалюминиевая (хромель-алюмелевая)	K	—200 ÷ +1000	1300
Платинородий (10%) -платиновая	(XA) S	0 ÷ +1300	1600
Платинородий (30%) -платинородиевая (6%)	(ПП) B	300—1600	1800
Вольфрамрений (5%) -вольфрамрениевая (20%)	(ПР) (BP)	0—2200	2500

Таблица 5.2. Основные значения термоэлектродвижущей силы стандартных термпар при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$

Температура, $^\circ\text{C}$	Термо-ЭДС, $\mu\text{В}$								
	Медь-копелевая	Медь-медноникелевая, тип T	Железо-медноникелевая, тип J	Хромель-копелевая (XA)	Никельхром-медноникелевая, тип E	Никельхром-никельальюминиевая (хромель-алюмелевая) тип K (XA)	Платинородий (10%-платиновая, тип S (ПП))	Платинородий (80%-платинородиевая 16%), тип B (ПР)	Вольфраморений (5%-вольфрамовый) (ВР)
-200	-6,153	-5,603	-7,890		-8,824	-5,892			
-100	-3,715	-3,378	-4,632		-5,237	-3,553			
0	0	0	0	0	0	0			
100	4,721	4,277	5,268	6,88	6,317	4,095	0,645		1,330
200		9,286	10,777	14,59	13,419	8,137	1,440		2,869
300		14,860	16,325	22,88	21,033	12,207	2,323	0,431	4,519
400		20,869	21,846	31,49	28,943	16,395	3,260	0,786	6,209
500			27,388	40,28	36,999	20,640	4,234	1,241	7,909
600			33,096	49,11	45,085	24,902	5,237	1,791	9,598
700			39,130	57,85	53,110	29,128	6,274	2,430	11,273
800			45,498	66,47	61,022	33,277	7,345	3,154	12,929
900			51,875		68,783	37,325	8,448	3,957	14,556
1000						41,269	9,585	4,833	16,136
1100						45,108	10,754	5,777	17,666
1200						48,828	11,947	6,783	19,146
1300							13,155	7,845	20,576
1400							14,368	8,952	21,963
1500							15,576	10,094	23,303
1600							16,771	11,257	24,590
1700								12,246	25,820
1800								13,585	26,999
2000									29,177
2200									31,136
2500									33,636

предел измерения ограничен окислением железа и медноникелевого сплава.

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

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

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

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

*Платинородий-платиновые* термоэлектрические термометры (тип S) могут длительно работать в интервале температур от 0 до 1300 °С, а кратковременно — до 1600 °С. Положительный термоэлектрод представляет со-

Таблица 5.3. Коэффициенты для определения пределов допускаемых отклонений термо-ЭДС термопар

Тип термопары	Класс точности	Рабочий диапазон, °С	a, °С	b·10 <sup>6</sup>	c, °С
Медь-копелевая	—	-200 ÷ 0 0 — 100	1,3	-1,1 0	0 0
Медь-медноникелевая	—	-200 ÷ -100 -100 ÷ 400	3	-20 0	-100 0
Железо-медноникелевая	—	-200 ÷ -100 -100 ÷ 400 400 ÷ 900	3	-20 0 7,5	-100 0 400
Хромель-копелевая	—	-50 ÷ 300 300 — 800	2,5	0 6,0	0 300
Никельхром-медноникелевая	—	-100 ÷ 400 400 — 900	4	0 7,5	0 400
Никельхром-никельалюминиевая	—	-200 ÷ -100 -100 ÷ 400 400 — 1300	4	-10 0 7,5	-100 0 400
Платинородий (10 %)-платиновая	1	0 — 300 300 — 1600	1,5	0 2	0 300
	2	0 — 600 600 — 1600	3	0 5	0 600
Платинородий (30 %)-платинородиевая (6 %)	—	300 — 600 600 — 1800	3	0 5	0 600
	—	0 — 1000 1000 — 1800 1800 — 2500	5 10	0 6,0 11,5	0 1000 1800

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

Платинородий-платинородиевые термоэлектрические термометры (тип В)

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

падает с градуировочной характеристикой ПР.

**Вольфрамовый-вольфраморениевые термоэлектрические термометры** предназначены для длительного измерения температур от 0 до 2200 °С и кратковременно до 2500 °С в вакууме, в нейтральной и восстановительной средах. Положительный термоэлектрод — сплав из 95 % вольфрама и 5 % рения, отрицательный — сплав из 80 % вольфрама и 20 % рения.

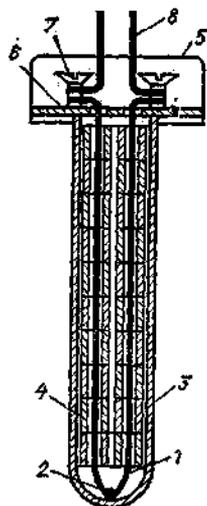


Рис. 5.7. Устройство термоэлектрического термометра

Пределы допускаемых отклонений измеренных значений термо-ЭДС термопар от основных значений, приводимых в табл. 5.2, должны определяться по уравнению

$$\Delta E = \pm [a + b(t - c)] dE/dt, \quad (5.10)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты, определяемые из табл. 5.3;  $dE/dt$  — коэффициент преобразования термопары, определяемый по значениям, приведенным в табл. 5.2. Допускаемые отклонения, выраженные в градусах, определяются выражением в квадратных скобках уравнения (5.10). Например, предел допускаемых отклонений для термопары хромель-копель в интервале  $-50 \div 300$  °С составляет

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

В интервале 300—800 °С предел допускаемых отклонений для той же термопары уже зависит от значения измеряемой температуры. Например, для  $t=600$  °С предел допускаемых отклонений

$$\Delta t = \pm [2,5 + 6 \cdot 10^{-3}(600 - 300)] = \pm 4,3 \text{ } ^\circ\text{C},$$

что соответствует  $\Delta E = \pm 4,3 \cdot 0,0878 = 0,38$  мВ.

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

дисилицид молибдена — дисилицид вольфрама ( $\text{MoSi}_2\text{—WSi}_2$ ) для измерения температур агрессивных газовых сред и некоторых расплавов в интервале температур до 1700 °С; углерод—борид циркония ( $\text{C—ZrB}_2$ ) для измерения температур жидких металлов до 1800 °С;

углерод—карбид титана ( $\text{C—TiC}$ ) для измерения неокислительных газовых сред до 2500 °С;

карбид ниобия — карбид циркония ( $\text{NbC—ZrC}$ ) для измерения в восстановительной и инертной среде или в вакууме до 3000 °С.

Для измерения низких температур (до  $-270$  °С) в промышленных установках применяют золотожелезо-никельхромовую ( $\text{AuFe—NiCr}$ ) термопару, которая практически не изменяет своего коэффициента преобразования в интервале температур ( $-200 \div -270$  °С).

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

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

Для удобства применения термоэлектрический термометр специальным образом армируется. При этом преследуются следующие цели: электрическая изоляция термоэлектродов; защита термоэлектродов от вредного воздействия измеряемой и окружающей сред; защита термоэлектродов и зажимов выводов термоэлектродов от загрязнений и механических повреждений; придание термоэлектрическому термометру необходимой механической прочности; обеспечение удобства монтажа на технологическом оборудовании и удобства подключения соединительных проводов. На рис. 5.7 показано устройство термоэлектрического термометра. Термоэлектроды 1 расположены так, что их спай 2 касается защитного чехла 3. На термоэлектроды надеты изоляционные бусы 4. На конце защитного чехла крепится головка термометра 5. В головке распо-

ложена колодка 6 с зажимами 7 для термоэлектродов и соединительных проводов 8.

Рабочий спай термоэлектрического термометра чаще всего изготавливается путем сварки, в отдельных случаях применяют пайку, а для вольфрам-ренийевых термометров — скрутку. В отдельных конструкциях термоэлектроды приваривают к защитному чехлу.

Электрическая изоляция термоэлектродов осуществляется материалами, сохраняющими свои изоляцион-

ные свойства в защитный чехол из газонепроницаемых материалов, выдерживающих необходимые высокие температуры и давления среды. Защитные чехлы изготавливают чаще всего из различных марок стали для температур до 1000 °С. При более высоких температурах применяются специальные чехлы из тугоплавких соединений (ГОСТ 13403-77). Эти чехлы изготавливаются из диборида циркония с молибденом для измерения температуры стали, чугуна и восстановительной газовой среды до 2200 °С. Для измерения расплавленного стекла и окислительной газовой среды до 1700 °С применяются чехлы из дисилицида молибдена. Большинство конструкций защитной арматуры термоэлектрических термометров в настоящее время унифицированы. Они отличаются в основном конструкцией защитных чехлов, рассчитанных на различные давления, и конструкцией штуцеров. Головка к защитным чехлам для многих модификаций одна и та же. Внешний вид некоторых серийно изготавливаемых термоэлектрических термометров представлен на рис. 5.8.

Большое распространение в последнее время получают термоэлектрические термометры кабельного типа. Они представляют собой два термоэлектроды, помещенные в тонкостенную оболочку (рис. 5.9). Пространство между термоэлектродами и оболочкой заполняется специальной изолирующей засыпкой (порошок  $MgO$  или  $Al_2O_3$ ). Оболочка изготавливается из нержавеющей или жаропрочной стали. Наружный диаметр оболочки — от 0,5 до 6 мм (ГОСТ 23847-79), длина — до 25 м. Выпускаются хромель-алюмелевые и хромель-копелевые термопреобразователи с изолированным (рис. 5.9, а) и неизолированным (рис. 5.9, б) спаями. Основные параметры и размеры кабельных термопреобразователей приведены в табл. 5.4. Они применяются в интервале температур от -50 до 900 °С (в оболочке из жаропрочной стали — до 1100 °С) при давлении до 40 МПа. Существенным преимуществом термометров кабельного типа является их радиационная стойкость, позволяющая им работать в энергетических реакторах АЭС, а также повышенная стойкость к тепловым ударам, вибрации, и механическим нагрузкам.

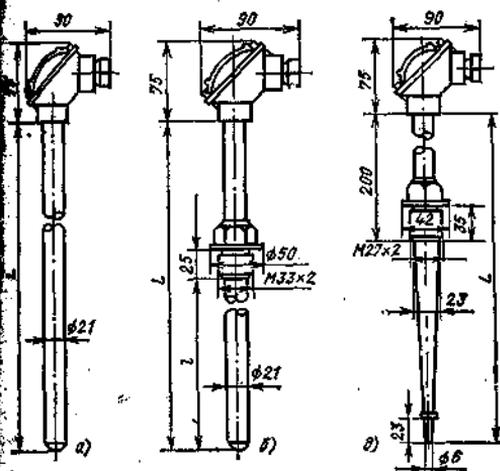


Рис. 5.8. Внешний вид некоторых термоэлектрических термометров



Рис. 5.9. Устройство термометров кабельного типа:

а, б — с изолированным и неизолированным спаями

ные свойства при соответствующих температурах и не загрязняющими термоэлектроды. Наибольшее распространение при температурах до 1300 °С получили фарфоровые одно- и двухканальные трубки и бусы, для более высоких температур применяются бусы из окиси алюминия и из других изоляционных материалов.

Для защиты термоэлектродов от воздействия измеряемой среды их по-

Таблица 5.4. Основные параметры и размеры кабельных термопреобразователей

Параметр	круглые с изолированным и неизолированным рабочим спаем							круглые с утоненным рабочим спаем				
	1,0	1,5	3,0	4,0	4,6	5,0	6,0	1,0	1,5			
Диаметр кабельного термопреобразователя, мм												
Диаметр утоненного участка, мм								0,5	0,8	0,5	0,8	1,0
Толщина плоского участка, мм	—											
Ширина плоского участка, мм	—							—				
Число и сечение электродов, мм <sup>2</sup>	2×0,03	2×0,06	2×0,3	2×0,5	4×0,44	2×0,6	2×0,9					
Диаметр электродов, мм	0,20	0,27	0,65	0,85	0,75	0,90	1,06	0,093	0,14	0,043	0,14	0,20
Толщина оболочки, мм	0,15	0,25	0,35	0,35	0,35	0,62	0,75	0,075	0,12	0,075	0,12	0,15
Длина, м: термопреобразователя	10		50		25	30	20	10				
утоненного участка	—							2				
плоского участка												
Число рабочих спаев												
Расстояние между спаями, мм	—							—				
Количество выводов: хромель												
алюмель или копель												
Показатель тепловой инерции, с	0,5	1,5	2,5	4,0	5,0	6,0	8,0	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5
Срок службы, лет	2		3		5			1				2
Диапазон длительного применения, °С:												
ХА	-50 ÷ 650				-50 ÷ 900			-50 ÷ 650				
ХК	-50 ÷ 400				-50 ÷ 600			-50 ÷ 400				

### 5.3. Удлиняющие термоэлектродные провода

Свободные концы термоэлектрического термометра, как указывалось выше, должны иметь температуру, равную 0°С, в противном случае их температура должна быть постоянной, чтобы можно было ввести поправку на температуру свободных концов. Если расположить свободные концы в головке термоэлектрического

термометра там, где кончаются термоэлектроды термометра, то невозможно обеспечить постоянство температуры свободных концов, так как температура головки термоэлектрического термометра, расположенного на технологической установке, будет зависеть от режима работы установки, температуры окружающего воздуха и других факторов. В связи с этим возникает необходимость удлинить термоэлектрический термометр, не искажая его

термопреобразователь с плоским рабочим участком										Многозонные	
3,0				1,0			1,5			3,0	6,0
0,5	0,8	1,0	1,5	—							
—				0,3	0,5	0,8	0,3	0,5	0,8	—	
—				1,8	1,5	1,15	2,8	2,3	2,0	—	
—				0,06×0,37	0,09×0,25	0,17×0,20	0,06×0,5	0,1×0,4	0,14×0,35	4×0,125	6×0,502
0,008	0,14	0,20	0,27	—						0,40	0,80
0,075	0,12	0,15	0,25	0,05	0,09	0,16	0,05	0,09	0,16	0,35	0,75
60				10						25	
2				—						—	
—				0,01—0,1						3	5
—				—						1000 или 1500	
—				—						3	5
—				—						1	
0,3	0,5	0,5	1,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	2,5	8,0
1		2		1						3	5
—50 ÷ 650 —50 ÷ 400				—50 ÷ 450 —50 ÷ 400						—50 ÷ 900 —50 ÷ 600	

термо-ЭДС, чтобы отвести свободные концы в такое место, где будет удобно их термостатировать или поставить устройство для автоматического введения поправки. Так как температуры головки термометра и мест прокладки проводов значительно ниже измеряемых, то это удлинение термометра должно осуществляться не обязательно теми же материалами, которые идут на изготовление термоэлектродов. Однако эти удлиняющие провода должны обладать определенными

свойствами, чтобы исключить возникновение паразитной термо-ЭДС. Возникновение паразитных термо-ЭДС будет исключено, если удлиняющие провода будут иметь ту же градуировочную характеристику, что и сам термометр. Докажем, что если удлиняющие провода  $c$  и  $d$  развивают ту же термо-ЭДС, что и термоэлектроды термометра  $a$  и  $b$ :

$$E_{cd}(t_1, t_2) = E_{ab}(t_1, t_2), \quad (5.11)$$

то включение таких проводов в цепь термометра не исказит его термо-ЭДС. Запишем термо-ЭДС, возникающую в цепи термоэлектрического термометра, следующим образом:

$$E = e_{ab}(t) + e_{bd}(t_1) + e_{de}(t_0) + e_{ec}(t_0) + e_{ca}(t_1). \quad (5.12)$$

Так как включение проводника  $e$  при равенстве температур мест его подсоединения не изменяет термо-ЭДС цепи, то можно записать

$$e_{de}(t_0) + e_{ec}(t_0) = e_{dc}(t_0). \quad (5.13)$$

Далее из (5.8) и (5.11) следует, что

$$e_{cd}(t_1) - e_{cd}(t_0) = e_{ab}(t_1) - e_{ab}(t_0) \quad (5.14)$$

и

$$e_{dc}(t_0) = e_{ab}(t_1) + e_{dc}(t_1) - e_{ab}(t_0). \quad (5.15)$$

Подставляя в (5.12) сначала (5.13), а затем (5.15), получим, учитывая (5.3):

$$E = e_{ab}(t) + e_{ab}(t_1) + e_{bd}(t_1) + e_{de}(t_1) + e_{ca}(t_1) - e_{ab}(t_0) = e_{ab}(t_0) = E_{ab}(t, t_0), \quad (5.16)$$

т.е. термо-ЭДС цепи термоэлектрического термометра не изменится, если термопара  $a-b$  будет удлинена проводами  $c-d$ , отвечающими условию (5.11). Однако при удлинении термопары следует для каждого типа термоэлектрических термометров подбирать провода, отвечающие условию (5.11). Кроме того, при подключении должна соблюдаться полярность. Места соединения удлиняющих проводов с термоэлектродами  $a$  с  $c$  и  $b$  с  $d$  должны иметь одинаковую температу-

ру  $t_1$ . Если это условие не соблюдается, то возникает паразитная термо-ЭДС, так как провода  $a$  и  $c$  и  $b$  и  $d$  могут быть не термоэлектродентичны.

Удлиняющие термоэлектродные провода выпускаются одно- и многожильными в изоляции и с внешним покрытием или оболочкой, удобными для монтажа и прокладки. Для изоляции применяют поливинилхлорид, полиэтилентерефталатную и фторопластовую пленку. Кроме изоляции провода часто покрывают поливинилхлоридной оболочкой или оплеткой из лавсановых нитей или стеклонитей. Если требуется защита от внешних электромагнитных полей и механических воздействий, применяют оплетку или экран из медных или стальных проволок (ГОСТ 24335-80).

Каждый материал провода имеет свой цвет изоляции или цветные нити в обмотке и оплетке проводов. В табл. 5.5 приведены типы термопар, рекомендуемые удлиняющие термоэлектродные провода, их обозначения и расцветка изоляции. Как видно из таблицы, в некоторых случаях для изготовления удлиняющих проводов применяются те же материалы, что и для изготовления термопар. Но применяются и другие материалы, отличные от термоэлектродов термопары. В табл. 5.6 приведены значения термо-ЭДС, которую развивают пары из удлиняющих термоэлектродных проводов при некоторых значениях температур их спаев. Эти провода отвечают

Таблица 5.5. Рекомендуемые удлиняющие термоэлектродные провода

Термопара	Удлиняющие термоэлектродные провода		
	Обозначение	Пара жил	Окраска
Медь-копелевая	МК	Медь-копель	Красная (розовая) — желтая (оранжевая)
Медь-медноникелевая	М	Медь-константан	Красная (розовая) — коричневая
Хромель-копелевая	ХК	Хромель-копель	Фиолетовая (черная) — желтая (оранжевая)
Никельхром-никельальюминиевая	М, МТ—НМ	Медь-константан, медь-титан-никель-медь	Красная (розовая) — коричневая, красная + зеленая — красная + синяя
Платинородий-платиновая	П	Медь-сплав ТП	Красная (розовая) — зеленая
Вольфрамрений-вольфрамрениевая	М—МН	Медь-сплав МН 2,4	Красная (розовая) — синяя (голубая)

Примечание. Для некоторых марок проводов расцветивается только один из проводов, цвет которого подчеркнут.

Таблица 5.6. Термо-ЭДС, развиваемая парой жил удлиняющих термоэлектродных проводов

Пара	Обозначение	Термо-ЭДС, мВ		Температура, °С	
		Номинальное значение	Предельное отклонение	рабочего спая	свободного конца
Медь-копель	МК	4,79	±0,10	100	0
Медь-константан	М	4,10	±0,15		
Хромель-копель	ХК	6,88	±0,20		
Медь-медноникелевый сплав МН 2,4	М—МН	1,40	±0,03	100	0
Медь-медноникелевый сплав ТП	П	0,64	±0,003		
Медь-титановый сплав-никельмедный сплав	МТ—НМ	4,10	±0,12	100	
		10,15	±0,12	250	
		12,21	±0,12	300	

условию (5.11) и в соответствующем интервале температур развивают практически такую же термо-ЭДС, что и термоэлектроды термпары.

#### 5.4. Милливольтметры

В настоящее время для измерения термо-ЭДС термоэлектрических термометров наибольшее распространение получили магнитоэлектрические милливольтметры, потенциометры — автоматические и с ручным управлением и нормирующие преобразователи.

Магнитоэлектрические милливольтметры получили широкое применение для измерения температур в комплекте с термоэлектрическими термометрами. Принцип действия милливольтметра основан на взаимодействии тока, проходящего через подвижную рамку прибора, с магнитным полем постоянного магнита. Направление силы, действующей на проводник в магнитном поле, определяется правилом левой руки, а ее значение

$$F = BI, \quad (5.17)$$

где  $l$  — длина проводника, м;  $B$  — магнитная индукция, Т;  $I$  — сила тока в проводнике, А.

Полюсные наконечники постоянного магнита делаются концентричными с сердечником, расположенным внутри рамки (рис. 5.10), состоящей из  $n$  витков размером  $l \times 2R$ . Рамка, вращаясь в зазоре между наконечниками и сердечником, всегда располагается параллельно магнитным силовым линиям, так что вращающий момент определяется уравнением

$$M_{вр} = 2RnF = 2nlRBI. \quad (5.18)$$

Для того чтобы угол поворота рамки был пропорционален силе проходяще-

го по ней тока, необходимо приложить к рамке противодействующий момент, пропорциональный углу поворота рамки. Такой момент создается спиральными пружинами (или подвеской), соединенными с осью рамки:

$$M_{пр} = C\varphi, \quad (5.19)$$

где  $C$  — удельный противодействующий момент;  $\varphi$  — угол поворота рамки.

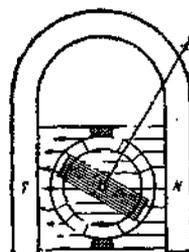


Рис. 5.10. Рамка милливольтметра в магнитном поле

При прохождении тока рамка с прикрепленной к ней стрелкой начнет поворачиваться до тех пор, пока не будет выполнено условие

$$M_{вр} = M_{пр}$$

или

$$2lnRBI = C\varphi,$$

откуда

$$\varphi = \frac{2lnRBI}{C} = SI. \quad (5.20)$$

Коэффициент  $S$  представляет собой чувствительность прибора:

$$S = \varphi/I. \quad (5.21)$$

Основными частями милливольтметра являются постоянный магнит с полюсными наконечниками, сердечник из магнитомягкой стали, рамка из большого числа витков (как правило, медной проволоки), скрепленных лаком.

Рамка жестко скреплена со стрелкой и образует подвижную систему милливольтметра, которая может поворачиваться вокруг своей оси. Подвод тока к рамке осуществляется через спиральные пружинки, которые одним концом соединены с рамкой, а другим — с неподвижными контактами. Последовательно с рамкой включен добавочный резистор. Трение в опорах рамки является одной из причин погрешности милливольтметра, оно же вызывает вариацию. В приборах высокой чувствительности вместо стрелки устанавливается зеркало для светового указателя угла поворота, а подвижная система крепится на растяжках или подвесках.

Изменение температуры воздуха, окружающего прибор, изменяет сопротивление рамки. При постоянной термо-ЭДС термометра это приводит к изменению тока, протекающего через прибор, соответствующему изменению его показаний [см. (5.20)]. Если бы сопротивление милливольтметра состояло только из рамки, выполненной из медной проволоки, то изменение температуры вызывало бы изменение сопротивления прибора примерно на 0,4 % на 1°C (температурный коэффициент меди составляет около 0,004 1/°C) и соответственно изменение показаний на 0,4 % на каждый градус изменения температуры воздуха, окружающего прибор. Для уменьшения изменения показаний милливольтметра последовательно с рамкой включен добавочный резистор, выполненный из марганца. Температурный коэффициент марганца на два порядка меньше температурного коэффициента меди и составляет около  $2 \cdot 10^{-5}$  1/°C.

Оценим температурный коэффициент милливольтметра, состоящего из рамки, выполненной из медной проволоки, и добавочного марганцевого резистора, сопротивление которого равно сопротивлению рамки, т. е.  $R_{мв} = R_p + R_d$ ,  $R_d = R_p$ . Изменение сопротивления прибора при изменении температуры на  $\Delta t$  составляет

$$\Delta R_{мв} = \Delta R_p + \Delta R_d = R_p \alpha_p \Delta t + R_d \alpha_d \Delta t = \Delta t (\alpha_p R_p + \alpha_d R_p). \quad (5.22)$$

Так как  $\alpha_p \gg \alpha_d$ ,

$$\Delta R_{мв} = R_p \alpha_p \Delta t. \quad (5.23)$$

Температурный коэффициент милливольтметра

$$\alpha_{мв} = \frac{\Delta R_{мв}}{R_{мв} \Delta t} = \frac{R_p \alpha_p \Delta t}{R_{мв} \Delta t} = \alpha_p \frac{R_p}{R_{мв}} \quad (5.24)$$

В нашем случае  $R_{мв} = R_p + R_d = 2R_p$  и  $\alpha_{мв} = 0,5 \alpha_p$ .

Как правило,  $R_d \approx (3 \div 4) R_p$ , поэтому

$$\alpha_{мв} \approx \alpha_p \frac{R_p}{R_p + (3 \div 4) R_p} \approx \alpha_p / (4 \div 5),$$

т. е. температурный коэффициент милливольтметров примерно в 4—5 раз меньше температурного коэффициента меди и составляет 0,08—0,1 % на 1°C. Кроме добавочного резистора для уменьшения температурного коэффициента милливольтметра применяют включение последовательно с рамкой полупроводникового терморезистора имеющего отрицательный температурный коэффициент сопротивления, также некоторые другие методы.

Милливольтметры, применяемые для измерения термо-ЭДС термоэлектрических термометров в промышленности и лабораторной практике, могут быть показывающими, самопишущими и регулирующими. По конструктивному исполнению приборы бывают щитовыми и переносными. Для переносных приборов установлены следующие классы точности (ГОСТ 9736-80): 0,2; 0,5 и 1,0, для щитовых — 0,5; 1,0 и 1,5. Щитовые милливольтметры типа М-64, МР-64-02 и МВР-6 выпускаются в плоскостной металлической корпусе и предназначены для утопленного монтажа на вертикальных щитах. Узкопрофильные милливольтметры со световым указателем типа МВУ-4 выпускаются для утопленного монтажа на вертикальных, горизонтальных и наклонных щитах. Милливольтметры, предназначенные для работы в комплекте с термоэлектрическими термометрами, могут иметь различные диапазоны измерения для стандартных градуировок термопар в пределах их применения (табл. 5.1). На шкале милливольтметра указывается градуировка термоэлектрического термометра (или пирометра полного излучения), в комплекте с которым должен работать данный милливольтметр. Шкалы могут начинаться как от 0°C, так и от других значений. Внутреннее сопротивление милливольтметра  $R_{мв}$  для класса точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 должно быть соответственно не менее 500; 500; 300; 200 Ом. Внешнее сопротивление милливольтметров, предназначенных для работы с термоэлектрическими термометрами, должно быть равно 5 или 15 Ом. Отклонение температуры окружающего воздуха от нормальной вызывает дополнительную погрешность, которая может достигать 0,5 предела допускаемой основной погрешности на каждые 10°C отклонения температуры.

### 5.5. Измерение термо-ЭДС милливольтметром

Термо-ЭДС термоэлектрического термометра однозначно зависит от

температуры рабочего спая, если температура свободных концов постоянна. Когда термо-ЭДС термометра измеряется милливольтметром, следует иметь в виду, что фактически милливольтметр измеряет не термо-ЭДС термометра, а ток, протекающий по рамке прибора. Поэтому для однозначности зависимости между термо-ЭДС и показаниями милливольтметра необходимо, чтобы сопротивление всей цепи термоэлектрический термометр — милливольтметр было постоянным. Если при этом добавить требование правильности показаний, то необходимо, чтобы сопротивление всей цепи не только было постоянным, но и равнялось градуировочному значению, т. е. равнялось тому значению сопротивления всей цепи, которое было при градуировке милливольтметра.

Проанализируем возможные причины, вызывающие погрешности при измерении термо-ЭДС милливольтметром. Показания милливольтметра определяются формулой

$$\varphi = SI = SE(t, t_0) / (R_{\text{мв}} + R_{\text{T}} + R_{\text{с.п}} + R_{\text{п.к}}), \quad (5.25)$$

где  $E(t, t_0)$  — термо-ЭДС термометра при температурах рабочего конца  $t$  и свободного конца  $t_0$ ;  $R_{\text{мв}}$  — сопротив-

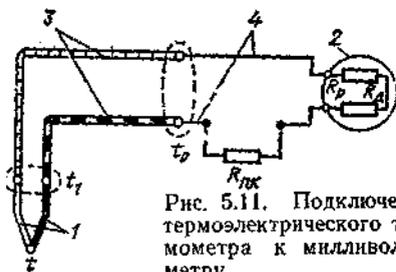


Рис. 5.11. Подключение термоэлектрического термометра к милливольтметру

ление милливольтметра;  $R_{\text{T}}$  — сопротивление термометра;  $R_{\text{с.п}}$  — сопротивление соединительных и удлиняющих проводов;  $R_{\text{п.к}}$  — сопротивление подгоночной катушки.

На рис. 5.11 представлена типичная схема подключения термоэлектрического термометра к милливольтметру. На схеме термоэлектрический термометр 1 подключается к милливольтметру 2 удлиняющими термоэлектродными 3 и соединительными 4 проводами. Для подгонки сопротивления внешней цепи до градуировочного зна-

чения применяется подгоночная катушка  $R_{\text{п.к}}$ . Изменение показаний милливольтметра может возникнуть в результате как изменения сопротивления внешней цепи, куда входят  $R_{\text{T}}$ ,  $R_{\text{с.п}}$  и  $R_{\text{п.к}}$ , так и изменения сопротивления самого милливольтметра  $R_{\text{мв}}$ . Чтобы уменьшить влияние изменения сопротивления внешней цепи на показания милливольтметра, необходимо уменьшить сопротивление термометра, соединительных и удлиняющих проводов, чтобы их доля в общем сопротивлении всей цепи термоэлектрический термометр — милливольтметр была незначительной. Для этого термоэлектроды термометра изготавливаются в большинстве случаев из проволоки диаметром 2—3 мм, а удлиняющие и соединительные провода применяют сечением 2—2,5 мм<sup>2</sup>. В этом случае сопротивление внешней цепи не превышает, как правило, 3—5 Ом. Как отмечалось выше, для однозначности зависимости показаний милливольтметра от термо-ЭДС сопротивление всей цепи термометр — милливольтметр должно быть постоянным и равным градуировочному значению. Для обеспечения этого постоянства милливольтметр находится в помещении с меньшими колебаниями температуры, чем у соединительных и удлиняющих проводов, а его сопротивление делается в сотни раз больше, чем сопротивление внешней цепи. Внутреннее сопротивление милливольтметра может изменяться от температуры окружающего воздуха. Но температурный коэффициент милливольтметра уменьшен за счет добавочного манганинового сопротивления [формула (5.24)]. Таким образом, изменение сопротивления цепи термометр — милливольтметр, вызываемое изменением температуры окружающей среды, существенно уменьшено, а вместе с ним и уменьшены температурные погрешности измерительной системы термометр — милливольтметр.

Можно определить изменение показаний милливольтметра в зависимости от изменения сопротивления цепи термометр — милливольтметр относительно градуировочного значения. Положим, что сопротивление всей цепи при градуировке имело значение  $R_{\text{гр}}$ , а затем в условиях эксплуатации оказалось равным  $R_{\text{ж}}$ . Согласно уравнению (5.25) показания милливольтметра в

условиях градуировки определялись выражением

$$\varphi_{гр} = SE(t, t_0)/R_{гр},$$

а в условиях эксплуатации — выражением

$$\varphi_{эк} = SE(t, t_0)/R_{эк},$$

откуда действительные показания милливольтметра

$$\varphi_{гр} = \varphi_{эк} R_{эк}/R_{гр}. \quad (5.26)$$

Относительное изменение показаний измерительной системы термометр — милливольтметр, вызванное отклонением сопротивления измерительной цепи от градуировочного значения, составляет

$$\delta\varphi = (\varphi_{эк} - \varphi_{гр})/\varphi_{гр} = (R_{гр} - R_{эк})/R_{эк}. \quad (5.27)$$

Следует отметить, что уравнения (5.26) и (5.27) выражают изменение показаний в милливольтах. Чтобы перевести эти изменения в температуру, необходимо учесть нелинейный характер зависимости термо-ЭДС от температуры.

Кроме сопротивления измерительной цепи на показания милливольтметра могут оказывать влияние следующие факторы: электростатические заряды, которые могут образовываться на стекле прибора; внешние магнитные поля от других приборов и ферромагнитного щита; изменение наклона прибора относительно рекомендованного техническими условиями положения.

В измерительной цепи термоэлектрический термометр — милливольтметр может возникнуть большая погрешность вследствие несоответствия температуры свободных концов термоэлектрического термометра градуировочному значению. Градуировочные характеристики (таблицы) термоэлектрических термометров составлены для температуры свободных концов  $0^\circ\text{C}$ . Если температура свободных концов термометра не равна  $0^\circ\text{C}$ , то необходимо вводить поправку на изменение термо-ЭДС относительно градуировочного значения [см. уравнение (5.6)]. В промышленных условиях стараются расположить свободные концы термоэлектрического термометра в таких местах, где температура мало изменяется. В этом случае постоянную по значению поправку на темпе-

ратуру свободных концов можно ввести путем смещения корректора стрелки милливольтметра на отметку соответствующую температуре свободных концов.

Однако в целом ряде случаев изменение температуры свободных концов оказывается значительным. В этом случае часто применяют устройство для автоматического введения поправки на температуру свободных концов. Это устройство (рис. 5.12) представляет собой мостовую схему, питаемую постоянным током. Три плеча моста  $R_1, R_2, R_3$  выполнены из манганина, а четвертое ( $R_4$ ) — из меди, которое изменяет свое сопротивление в зависимости от температуры. При температуре  $0^\circ\text{C}$  мост находится в равновесии. Если температура моста будет отличаться от  $0^\circ\text{C}$ , то между вершинами  $a$  и  $b$  возникнет разность

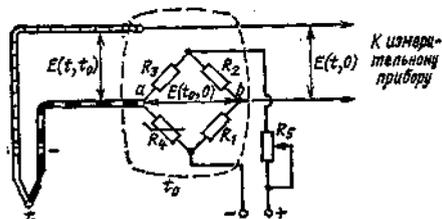


Рис. 5.12. Измерение термо-ЭДС с устройством для автоматического введения поправки на температуру свободных концов

потенциалов  $U_{ab}$ . При этом должно выполняться условие

$$U_{ab} = E(t_0, 0). \quad (5.28)$$

Резистор  $R_5$  может быть использован как для корректировки сигнала  $U_{ab}$ , так и при необходимости его существенного изменения, например при переходе от одной градуировки термометра к другой. Таким образом, разность потенциалов  $U_{ab}$  изменяется в зависимости от температуры так же, как и термо-ЭДС термометра. Напряжение  $U_{ab}$  равно значению поправки на температуру свободных концов  $E(t_0, 0)$ . Свободные концы термоэлектрического термометра располагаются на зажимах этого устройства, т. е. температура свободных концов термометра и температура устройства равны  $t_0$  для того, чтобы  $U_{ab}$  соответствовало именно той поправке, которую надо вводить для данной температуры свободных концов. Устройство

для автоматического введения поправки включается последовательно с термоэлектрическим термометром так, чтобы поправка  $U_{ab} = E(t_0, 0)$  суммировалась с термо-ЭДС термоэлектрического термометра. Таким образом, на входе в измерительный прибор сигнал равен  $E(t, 0)$ .

Такой способ автоматического введения поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра применяется при измерении термо-ЭДС милливольтметрами, в различных измерительных преобразователях и других средствах измерения. Следует заметить, что в измерительной цепи термоэлектрический термометр — устройство для введения поправки — милливольтметр разность потенциалов  $U_{MB}$  на зажимах милливольтметра не равна  $E(t, 0)$ , а определяется выражением

$$U_{MB} = IR_{MB} = E(t, 0) \frac{R_{MB}}{R_{MB} + R_{BH}}, \quad (5.29)$$

где  $I$  — ток в цепи термометр — милливольтметр;  $R_{MB}$  — внутреннее сопротивление милливольтметра;  $R_{BH}$  — сопротивление внешней для милливольтметра цепи, куда входят сопротивления термометра, удлиняющих и соединительных проводов и подгоночной катушки [см. (5.25)].

Следует заметить, что при данном способе введения поправки на температуру свободных концов может иметь место погрешность, вызванная несоответствием  $U_{ab}$  и  $E(t_0, 0)$  в широком диапазоне изменения температуры, так как изменение разности потенциалов на вершинах моста  $U_{ab}$  с изменением температуры  $t$  не идеально воспроизводит градуировочную характеристику термометра  $E(t, 0)$ .

### 5.6. Компенсационный метод измерения термо-ЭДС

Компенсационный метод измерения основан на уравнивании измеряемой ЭДС падением напряжения, значение которого может быть определено. На рис. 5.13 изображен простейший вариант компенсационного метода измерения термо-ЭДС. Источник термо-ЭДС  $E_T$  подключен к делителю напряжения  $R_p$ , питаемому от источника питания  $E$ , таким образом, что падение напряжения на делителе  $U_{ab}$  включено навстречу  $E_T$ . Перемещая

движок делителя, можно найти положение, когда  $U_{ab} = E_T$ . В этом случае термо-ЭДС  $E_T$  будет уравновешена падением напряжения  $U_{ab}$ , ток в цепи источника термо-ЭДС (например, термоэлектрического термометра) будет отсутствовать и высокочувствительный нуль-гальванометр  $НГ$  покажет нуль. Чтобы определить значение термо-ЭДС  $E_T$ , надо определить падение напряжения:

$$U_{ab} = IR_{ab}. \quad (5.30)$$

Значение тока  $I$ , протекающего в рабочем контуре, может быть определено по показаниям миллиамперметра. На этом простейшем варианте видно

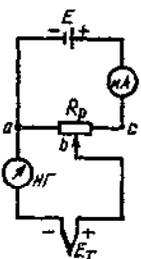


Рис. 5.13. Компенсационный метод измерения термо-ЭДС

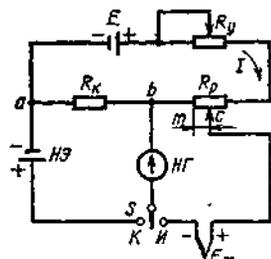


Рис. 5.14. Потенциометр с постоянной силой рабочего тока

главное преимущество компенсационного метода измерения термо-ЭДС, заключающееся в том, что результаты измерения не зависят от сопротивления цепи термоэлектрического термометра. Вспомним, что при измерении термо-ЭДС милливольтметром сопротивление цепи определяло результаты измерения. Поэтому компенсационный метод измерения принципиально лучше, чем измерение термо-ЭДС милливольтметром. Однако точность измерения в нашем случае не будет существенно выше, чем при измерении милливольтметром, так как классы точности миллиамперметра, которым измеряют ток  $I$  в рабочем контуре, и милливольтметра практически одинаковы. Для более эффективного использования преимущества компенсационного метода измерения термо-ЭДС надо повысить точность определения рабочего тока. Эта задача решается в схеме *потенциометра с постоянной силой рабочего тока* (рис. 5.14).

Потенциометр питается от источника тока напряжением  $E$ , значение рабочего тока  $I$  может изменяться пе-

ременным резистором  $R_y$ . Для точной установки рабочего тока падение напряжения на постоянном резисторе с известным сопротивлением  $R_k$  сравнивается с ЭДС нормального элемента  $E_{н.э}$ . Нормальный элемент — это электрохимический источник постоянной ЭДС, которая известна с высокой степенью точности, например 1,0186 В. Нормальный элемент имеет очень малую мощность и поэтому использовать его как источник питания нельзя; его можно использовать только как эталон постоянной разности потенциалов (мера ЭДС). В насыщенных нормальных элементах наибольший допустимый ток составляет 1 мкА, а для ненасыщенных нормальных элементов — 10 мкА. В схеме потенциометра с ЭДС нормального элемента сравнивается падение напряжения  $U_{ab}$ , образованное в результате прохождения рабочего тока  $I$  через резистор  $R_k$ . Переключатель  $S$  стоит в этом случае в положении  $K$  — контроль. Если  $U_{ab} \neq E_{н.э}$ , то значение рабочего тока установлено неправильно и следует с помощью  $R_y$  изменять значение тока  $I$  до тех пор, когда  $U_{ab}$  будет равно  $E_{н.э}$ . При выполнении этого условия ток в цепи нормальный элемент — нуль-гальванометр отсутствует и нуль-гальванометр показывает нуль. Сопротивление резистора  $R_k$  берется обычно равным 509,3 Ом; в этом случае при выполнении условия  $E_{н.э} = U_{ab}$  рабочий ток

$$I = E_{н.э} / R_k = 1,0186 / 509,3 = 0,002000 \text{ А} = 2 \text{ мА}, \quad (5.31)$$

т. е. рабочий ток установлен с точностью до четвертого знака. После того как установлен рабочий ток, переключатель  $S$  переводится в положение  $И$  — измерение и термо-ЭДС термометра  $E_T$  уравнивается падением напряжения  $U_{bc}$  путем перемещения движка резистора  $R_p$ . Этот резистор (как правило, проволочный) изготавливается специальным образом, имеет линейную зависимость сопротивления от перемещения движка и называется реохордом. Уравнивание  $E_T$  падением напряжения  $U_{bc}$  будет выполнено тогда, когда нуль-гальванометр покажет отсутствие тока в цепи термоэлектрический термометр — нуль-гальванометр. Компенсирующее напряжение

$$U_{bc} = ImR_p, \quad (5.32)$$

где  $m$  — часть сопротивления реохорда левее движка  $c$ , или

$$U_{bc} = (E_{н.э} / R_k) m R_p. \quad (5.33)$$

Если  $R_p$ ,  $R_k$  и  $E_{н.э}$  остаются постоянными, то можно положение движка реохорда  $m$  отградуировать в единицах падения напряжения (мВ). Но это будет справедливо только для вполне определенного тока  $I$  [см. (5.31)], поэтому при измерении необходимо систематически проверять и, если нужно, устанавливать значение рабочего тока.

В связи с тем что в потенциометре не только реализуется компенсационный метод измерения термо-ЭДС, но и повышается точность измерения путем установки всегда одного и того же значения рабочего тока, а также в результате отсутствия токоизмерительных приборов, применение потенциометра с постоянной силой рабочего тока для измерения термо-ЭДС имеет следующие преимущества:

1) независимость показаний от изменения сопротивления внешней цепи (преимущество компенсационного метода);

2) повышение точности измерения за счет повышения точности установки тока  $I$  (точность установки определяется точностью  $E_{н.э}$  и  $R_{н.э}$ : как правило,  $\Delta E_{н.э} < 0,01\%$  и  $\Delta R_{н.э} < 0,02\%$ ).

Предельная погрешность потенциометров составляет 0,05% и менее.

Потенциометры существенно повышают точность измерения термо-ЭДС. Однако при измерении температуры по термо-ЭДС термоэлектрического термометра может иметь место погрешность, вызванная непостоянством температуры свободных концов или несоответствием ее градуировочному значению. Кроме того, на точность уравнивания термо-ЭДС падением напряжения на реохорде может влиять чувствительность нуль-гальванометра. Например, порог чувствительности нуль-гальванометра по току составляет  $\Delta I = 1 \cdot 10^{-7}$  А. При сопротивлении 10 Ом цепи нуль-гальванометр — термоэлектрический термометр это будет вызывать разность термо-ЭДС и падения напряжения на реохорде  $\Delta U = \Delta I R = 10^{-7} \cdot 10 = 10^{-6}$  В = 0,001 мВ. Если сопротивление цепи составляет 1000 Ом, то  $\Delta U = 10^{-7} \times 1000 = 10^{-4}$  В = 0,1 мВ. Такое несо-

ответствие для термометра градуировки никельхром-никельалюминий (хромель-алюмель) вызовет погрешность измерения температуры около  $2,5^{\circ}\text{C}$ .

### 5.7. Автоматические потенциометры

Автоматические потенциометры, как следует из названия, служат для компенсационного измерения термо-ЭДС без участия человека, которое было необходимо для ручного уравновешивания в обычных неавтоматических потенциометрах. Измерительная схема автоматического потенциометра не отличается принципиально от схемы потенциометра с ручным уравновешиванием. Однако в связи с тем, что автоматический потенциометр выполняет ряд дополнительных функций, учитывая особенности серийного производства, имеется некоторое отличие в схеме автоматического потенциометра. В автоматических потенциометрах, предназначенных для измерения температуры термометрами конкретной градуировки, автоматически вводится поправка на температуру свободных концов. В современных автоматических потенциометрах питание измерительной схемы осуществляется от источника стабилизированного питания. На рис. 5.15 представлена упрощенная схема автоматического потенциометра, а на рис. 5.16 — более полная измерительная схема.

Работа автоматического потенциометра осуществляется следующим образом. Термо-ЭДС термоэлектрического термометра  $E_T$  уравновешивается падением напряжения на участке  $b-e$  (рис. 5.15 и 5.16). Это уравновешивание происходит автоматически. Если  $U_{be} \neq E_T$ , то на вход электронного блока  $\mathcal{ЭБ}$  поступает разность сигналов  $\Delta U = U_{be} - E_T$ , которая в  $\mathcal{ЭБ}$  преобразуется из постоянного тока в переменный и усиливается по напряжению и по мощности. Результирующий выходной сигнал  $\mathcal{ЭБ}$  поступает на реверсивный двигатель  $\text{РД}$ , который перемещает движок реохорда  $R_p$  таким образом, что  $\Delta U$  начинает уменьшаться и затем становится равным нулю. Как только  $\Delta U = 0$ , а это будет, когда  $U_{be} = E_T$ , выходной сигнал  $\mathcal{ЭБ}$  не будет вызывать движения реверсивного двигателя  $\text{РД}$  и движок реохорда остановится. Вместе с перемещением движка по реохорду одновременно

перемещаются стрелка прибора по шкале и перо по диаграммной бумаге. При перемещении движка реохорда от начальной  $b'$  до конечной  $b''$  точки реохорда происходит изменение потенциала точки  $b$  на величину, соот-

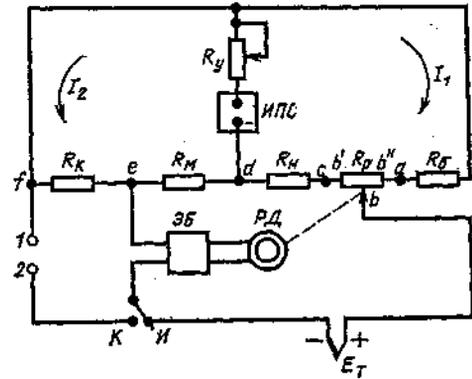


Рис. 5.15. Упрощенная измерительная схема автоматического потенциометра

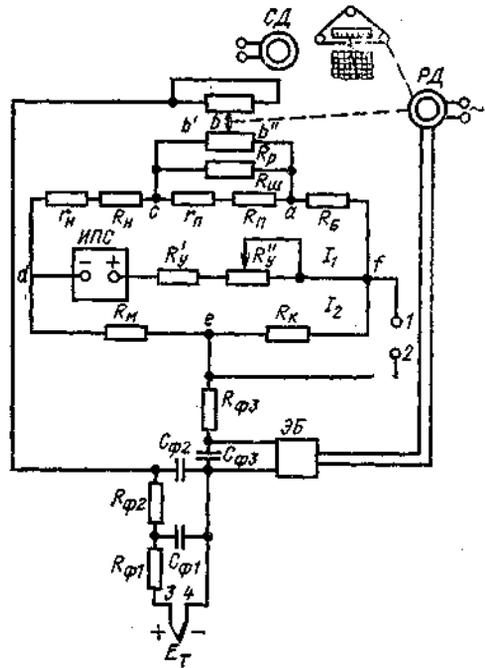


Рис. 5.16. Полная измерительная схема автоматического потенциометра

ответствующую диапазону измерения данного потенциометра.

Для стабилизации рабочего тока в потенциометре используется источник питания стабилизированный ИПС, обеспечивающий постоянство рабочего тока с погрешностью не более  $\pm 0,02\%$ .

Для автоматического введения поправки на температуру свободных концов термоэлектрического термометра в схеме потенциометра включено сопротивление  $R_M$ , выполненное из медной проволоки (все остальные сопротивления схемы выполнены из манганина). Термоэлектрический термометр подключается к автоматическому потенциометру удлиняющими проводами и поэтому свободные концы термометра находятся на зажимах потенциометра. Медный резистор  $R_M$  расположен рядом со свободными концами термоэлектрического термометра и поэтому  $R_M$  и свободные концы имеют одну и ту же температуру  $t_0$ . Для того чтобы ввести поправку на температуру свободных концов, необходимо в измерительной схеме потенциометра автоматически выработать сигнал, равный  $E(t_0, 0)$ , и прибавить его к термо-ЭДС термометра. Для этого медный резистор подбирается из условия

$$\Delta U_{R_M} \Big|_{t_0}^{t_0'} = \Delta E_T \Big|_{t_0}^{t_0'} \quad (5.34)$$

т. е. изменение падения напряжения  $\Delta U$  на медном резисторе  $R_M$  при изменении температуры от  $t_0$  до  $t_0'$  должно равняться изменению термо-ЭДС термометра  $\Delta E_T$  при том же изменении температуры от  $t_0$  до  $t_0'$ . Условие (5.34) можно представить в виде

$$I_2 \Delta R_M \Big|_{t_0}^{t_0'} = E(t_0', t_0)$$

или

$$I_2 \alpha (t_0' - t_0) R_{M0} = E(t_0', t_0) \quad (5.35)$$

откуда сопротивление медного резистора при  $t=0^\circ\text{C}$  будет составлять

$$R_{M0} = \frac{E(t_0', t_0)}{I_2 \alpha (t_0' - t_0)} \quad (5.36)$$

Поправка определяется из выражения

$$E(t_0, 0) = \Delta U_{R_M} \Big|_{t=0}^{t_0} \quad (5.37)$$

Термо-ЭДС термоэлектрического термометра уравнивается падением напряжения на участке  $b-c-d-e$ :

$$E(t, t_0) = U_{bcde} = U_{bc} + U_{cd} - U_{de} \quad (5.38)$$

или

$$E(t, t_0) = I_1 m R_p + I_1 R_n - I_2 R_M \quad (5.39)$$

Для схемы рис. 5.16 вместо  $R_p$  подставляем  $R_{np}$ , которое определяется

приведенным сопротивлением трех параллельно включенных резисторов  $R_{ш}$  и  $R_n + r_n$ . Сопротивление  $R_M$  можно представить в виде

$$R_M = R_{M0} + \Delta R_M \Big|_0^{t_0}$$

тогда выражение (5.39) можно записать следующим образом:

$$E(t, t_0) = I_1 m R_p + I_1 R_n - I_2 R_{M0} - I_2 \Delta R_M \Big|_0^{t_0} \quad (5.40)$$

Но

$$I_2 \Delta R_M \Big|_0^{t_0} = E(t_0, 0) \text{ из уравнения (5.36)}$$

тогда

$$E(t, t_0) = I_1 m R_p + I_1 R_n - I_2 R_{M0} - E(t_0, 0) \quad (5.41)$$

Значение  $R_n$  подбирается таким образом, чтобы

$$I_1 R_n - I_2 R_{M0} = 0 \quad (5.42)$$

Заметим, что  $I_1 R_n - I_2 R_{M0} = E_{нач}$  для безнулевой шкалы. Тогда

$$E(t, t_0) + E(t_0, 0) = I_1 m R_p \quad (5.43)$$

или

$$E(t, 0) = I_1 m R_p \quad (5.44)$$

При этом показания потенциометра (положение  $m$  движка реохорда) определяются только температурой рабочего спая термометра  $t$  и не зависят от температуры свободных концов  $t_0$ .

В схеме автоматического потенциометра уравнивание термо-ЭДС осуществляется на участке  $b-e$ , по отдельным резисторам которого протекают различные по знаку и значению токи  $I_1$  и  $I_2$ . Это сделано для того, чтобы можно было не только уравновесить термо-ЭДС, но и ввести поправку на температуру свободных концов. Для этого существует два контура с рабочими токами  $I_1$  и  $I_2$ , имеющими разное направление, так как уравнивающее падение напряжения и напряжение для введения поправки должны иметь разные знаки. Сопротивление реохорда упрощено (рис. 5.15) представлено в виде  $R_p$ . В действительности узел реохорда (рис. 5.16) состоит из трех параллельно включенных сопротивлений: собственно реохорда  $R_p$ , шунта  $R_{ш}$  и сопротивлений  $R_n$  для установки и  $r_n$  для подгонки диапазона измерения. Это вызывается следующими обстоятельствами. Реохорд изготавливается

путем намотки на каркас большого числа витков (1200—1600) тонкой проволоки и имеет значительное сопротивление, у которого различные значения. Поэтому для удобства дальнейшего выпуска приборов реохорд шунтируется резистором  $R_{ш}$  таким образом, чтобы сопротивление параллельно включенных реохорда  $R_p$  и шунта  $R_{ш}$  равнялось 90 или 100 Ом. Сопротивление  $R_{п}$ , устанавливающее диапазон измерения, подбирается таким образом, чтобы

$$I_1 R_{пр} = E_{кон} - E_{нач}, \quad (5.45)$$

где  $R_{пр} = R_0 R_{ш} / (R_0 + R_{ш})$ ;  $R_0 = R_p R_{ш} / (R_p + R_{ш})$ ;  $E_{кон}$  и  $E_{нач}$  — термо-ЭДС термоэлектрического термометра, соответствующие температурам конечной  $t_{кон}$  и начальной  $t_{нач}$  отметок диапазона измерения, мВ;  $E_{кон} - E_{нач}$  — диапазон измерения потенциометра, мВ.

Резистор  $R_6$  служит для установления одного и того же сопротивления цепи  $R_{ш} + R_{пр} + R_6$ . Для различных градуировок и диапазонов измерения  $R_6$  и  $R_{пр}$  принимают различные значения, а ток  $I_1$ , протекающий через эти сопротивления, должен иметь всегда одно и то же значение  $I_1 = 3$  мА, поэтому

$$R_6 = E_{дт} / I_1 - R_{ш} - R_{пр}, \quad (5.46)$$

причем  $E_{дт} = 1019$  мВ.

Резистор  $R_k$  служит для проверки работы ИПС с помощью нормально-то элемента, подключаемого эпизоди-

чески зажимами 1, 2. Для тока  $I_2 = 2$  мА

$$R_k = E_{н.в.} / I_2 = 1019 / 2 = 509,5 \text{ Ом.} \quad (5.47)$$

В реальной схеме автоматического потенциометра (рис. 5.16) термоэлектрический термометр подключается в измерительную схему через фильтры, образованные элементами  $R_{Ф1}$ ,  $C_{Ф1}$ ,  $R_{Ф2}$ ,  $C_{Ф2}$ ,  $R_{Ф3}$  и  $C_{Ф3}$ . Эти фильтры служат для устранения наводок и помех, возникающих в проводах между термометром и потенциометром.

В настоящее время выпускаются автоматические потенциометры показывающие, показывающие и самопишущие, одно- и многоточечные. Самопишущие односточечные приборы осуществляют запись на ленточной (КСП4, КСП2, КСП1) или дисковой (КСП3) диаграммной бумаге. Скорость движения ленточной диаграммы — от 20 до 54 000 мм/ч. В многоточечных приборах применяется печатающий механизм на 2, 3, 6 и 12 точек записи на ленточной диаграмме. Время пробега стрелки (каретки) всей шкалы 1; 2,5 и 10 с. Для специальных быстродействующих автоматических потенциометров время пробега стрелки составляет 0,15—0,25 с и скорость движения диаграммной ленты достигает 720 000—900 000 мм/ч. Класс точности автоматических потенциометров равен 0,25 и 0,5 для КСП4; 0,5 и 1 — для других модификаций. Потенциометры выпускаются четырех габаритов: полногабаритные (КСП4), малогабаритные (КСП3 и КСП2) миниатюрные показывающие КПП1, показывающие с вращающейся шкалой КВП1 и показывающие и самопишущие КСП1. У полногабаритных ширина диаграммной ленты 250 мм, у малогабаритных 160 мм, у миниатюрных 100 мм. Средний срок службы приборов до среднего ремонта — не менее 10 лет. Автоматические потенциометры типа КСП1 могут осуществлять дистанционную передачу показаний реостатными датчиками или с помощью преобразователей: пневматических, токовых, частотных и ферродинамических. В приборы могут встраиваться сигнализирующие и регулирующие устройства.

## Глава шестая

### ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

#### 6.1. Общие сведения о термометрах сопротивления

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

пературы, он может быть определен как

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

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

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

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

Температурный коэффициент выражается в  $^\circ\text{C}^{-1}$  или  $\text{K}^{-1}$ . Для большин-

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

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

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

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

где  $R_t$  и  $R_0$  — сопротивление термометра при температуре  $t$  и  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления медной проволоки,  $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

В связи с окисляемостью меди она используется для измерения температур не выше  $200^\circ\text{C}$ . К числу недостатков меди следует отнести малое

удельное сопротивление:  $\rho = 0,17 \times 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Удельное сопротивление влияет на габариты термометра с сопротивлением: чем меньше удельное сопротивление, тем больше нужна проволока, чтобы намотать такое же сопротивление, тем больше габариты термометра.

*Медные термометры сопротивления* в соответствии с ГОСТ 6651-78 могут применяться для длительного измерения температуры от  $-200$  до  $+200^\circ\text{C}$ . Они выпускаются II и III классов. Номинальные сопротивления при  $0^\circ\text{C}$  составляют 10, 50 и 100 Ом (в эксплуатации пока находятся термометры  $R_0 = 53 \text{ Ом}$ ), им соответственно присвоены следующие условные обозначения номинальных статических характеристик преобразования: 10М, 50М и 100М (для термометров с  $R_0 = 53 \text{ Ом}$  принято обозначение гр. 23). Номинальные статические характеристики преобразования для медных термометров приведены в табл. 6.1. Предел допускаемой основной погрешности выбирается из ряда 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 и  $20^\circ\text{C}$ . Для термометров II класса он, как правило, составляет 0,3 или  $0,5^\circ\text{C}$ , а для III класса 1 или  $2^\circ\text{C}$ .

В соответствии со стандартом СЭИ 1057-78 выпускаются *никелевые термометры сопротивления* на интервал температур от  $-60$  до  $+180^\circ\text{C}$ . Они выпускаются III класса. Номинальные сопротивления при  $0^\circ\text{C}$  составляют 5 и 100 Ом. Никель обладает высоким температурным коэффициентом, достигающим  $\alpha = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , и большим удельным сопротивлением  $\rho = 1,28 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , что позволяет получать достаточно малогабаритные термометры с большим коэффициентом преобразования. Номинальное отношение  $R_{100}/R_0$  для слабо легированного никеля установлено  $1,617 \pm 0,004$ . Номинальные статические характеристики преобразования для никелевых термометров приведены в табл. 6.2.

Чистая платина является одним из наиболее распространенных металлов, применяемых для изготовления термометров сопротивления. Платина отвечает обязательным требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления термометров сопротивления. Платиновые термопреобразователи сопротивления применяются для измерения температур от  $-260$  до

Таблица 6.1. Номинальные статические характеристики преобразования медных термопреобразователей сопротивления для диапазонов температур  $-200 + 200^{\circ}\text{C}$  типа ТСМ

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

$+1100^{\circ}\text{C}$  (ГОСТ 6651-78). Сопротивление платины имеет сложную нелинейную зависимость от температуры и для интервала температур от 0 до  $630^{\circ}\text{C}$  может быть приближенно описано выражением

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

а на интервале от  $-183$  до  $0^{\circ}\text{C}$  — выражением

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

Платиновые термометры сопротивления могут иметь следующие сопротивления при  $0^{\circ}\text{C}$ : 1, 5, 10, 50, 100 и 500 Ом (в эксплуатации находятся термометры с  $R_0=46$  Ом). Этим тер-

мопреобразователям сопротивления присвоены следующие условные обозначения номинальной статической характеристики преобразования: 1П, 5П, 10П, 50П, 100П и 500П (термометры с сопротивлением  $R_0=46$  Ом обозначаются гр. 21). Номинальные статические характеристики преобразования платиновых термометров сопротивления приведены в табл. 6.3.

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

Таблица 6.2. Номинальные статические характеристики преобразования никелевых термопреобразователей сопротивления

Температура термопреобразователя, $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление термопреобразователя $^{\circ}\text{C}$ , Ом, для температуры		Температура термопреобразователя, $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление термопреобразователя $^{\circ}\text{C}$ , Ом, для температуры		Температура термопреобразователя, $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление термопреобразователя $^{\circ}\text{C}$ , Ом, для температуры	
-60	69,50	34,75	20	111,30	55,65	100	161,70	80,85
-50	74,20	37,10	30	117,10	58,55	110	168,70	84,35
-40	79,10	39,55	40	123,00	61,50	120	175,90	87,95
-30	84,10	42,05	50	129,10	64,55	130	183,30	91,65
-20	89,30	44,65	60	135,30	67,65	140	190,90	95,45
-10	94,60	47,30	70	141,70	70,85	150	198,70	99,35
0	100,00	50,00	80	148,20	74,10	160	206,70	103,35
10	105,60	52,80	90	151,90	75,95	170	214,90	107,45
						180	223,10	111,55

Т а б л и ц а 6.3. Номинальные статические характеристики преобразования платиновых термопреобразователей сопротивления

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

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

Кроме металлов для изготовления термометров сопротивления применяют также полупроводниковые материалы: германий, окислы меди, марганца, кобальта, магния, титана и их смеси. Большинство полупроводниковых материалов обладает большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления и также очень большим удельным сопротивлением. Поэтому можно изготавливать очень малые по размерам чувствительные элементы термопреобразователей сопротивления, обладающих

значительным коэффициентом преобразования. Зависимость сопротивления полупроводникового термопреобразователя (терморезистора) от температуры может быть описана выражением

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

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

нию воспроизводимости), все полупроводниковые термопреобразователи сопротивления имеют индивидуальные градуировочные характеристики. Особенно большое распространение получили германиевые терморезисторы для измерения температур от 1,5 К и выше. Для интервала от 4,2 до 13,81 К они применяются для воспроизведения температурной шкалы. Германиевые терморезисторы, применяемые для технических измерений, имеют предел допускаемых погрешностей  $\pm(0,05 \div 0,1)$  К. Для эталонных германиевых терморезисторов стабильность градуировочной характеристики не хуже  $\pm 0,001$  К.

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

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

## 6.2. Устройство термометров сопротивления

Чувствительный элемент металлического термометра сопротивления состоит, как правило, из проволоки или ленты, которая намотана на каркас из стекла, кварца, керамики, слюды или пластмассы. От чувствительного элемента идут выводы к зажимам головки термометра, к которым подсоединяются провода, идущие затем к измерительному прибору. Вариант устройства термометра сопротивления приведен на рис. 6.1. Чувствительный элемент термометра сопротивления выполняется в виде спирали из проволоки 1, помещенной в четырехканальный керамический каркас 2. Для защиты от механических повреждений и вредного воздействия измеряемой или окружающей среды чувствительный элемент помещен в защитную оболочку 3, которая уплотнена керамической втулкой 4. Выводы 5 чувствительного эле-

мента проходят через изоляционную керамическую трубу 6. Все это находится в защитном чехле 7, установленном на объекте измерения с помощью резьбового штуцера 8. На конце защитного чехла располагается соединительная головка 9 термометра. В головке находится изоляционная колодка 10 с винтами 11 для крепления вы-

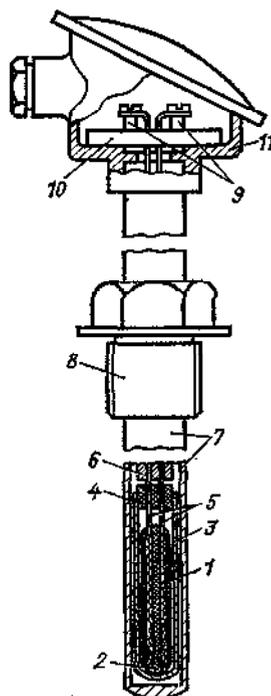


Рис. 6.1. Устройство термометра сопротивления

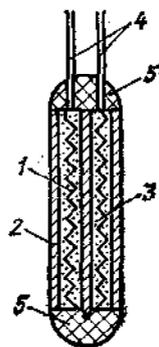


Рис. 6.2. Чувствительный элемент платинового термометра сопротивления

водов термометра и подключения соединительных проводов. Головка закрывается крышкой. Соединительные провода выводятся через штуцер. Для уменьшения влияния внешних электрических и магнитных полей чувствительные элементы термометров сопротивления делают с безындуктивной намоткой.

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

Чувствительный элемент платиновых термометров состоит из двух или четырех платиновых спиралей 1, расположенных в капиллярных каналах керамического каркаса 2 (рис. 6.2). Каналы каркаса заполняются керамическим порошком 3, который служит изолятором и создает подпружинивание спиралей. К концам спиралей припаяны выводы 4 из платиновой или иридиевой проволоки. Чувствительный элемент в керамическом каркасе герметизируется специальной глазурью 5. Такая конструкция обеспечивает хорошую герметичность ввиду малой газопроницаемости керамики каркаса и глазури. Закрепление спирали только в двух точках обеспечивает незначительное механическое напряжение. Чувствительные элементы оказываются вследствие плотной засыпки пространства между спиралями и каркасом керамическим порошком достаточно прочными и вибростойкими. Они могут применяться в интервале температур от  $-260$  до  $+1000$  °С. Специально для низкотемпературных измерений разработаны конструкции миниатюрных платиновых термометров сопротивления (см. § 9.4).

В эксплуатации применяются чувствительные элементы платиновых термометров сопротивления со слюдяным каркасом, на котором намотана специальным образом неизолированная

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

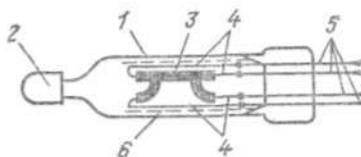


Рис. 6.3. Чувствительный элемент германиевого термометра сопротивления

Германиевые термометры сопротивления для низкотемпературных измерений представляют собой медную луженую гильзу 1 (рис. 6.3), которая заполнена газообразным гелием и закрыта герметичной пробкой 2. Внутри гильзы находится монокристалл германия 3, легированного сурьмой. К кристаллу приварены четыре золотых проводника 4, к которым припаяны платиновые выводы 5. Кристалл изолирован пленкой 6. Такие термометры применяются для измерения температур от 1,5 до 50 К.

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

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

При измерении температуры термометрами сопротивления возникает необходимость измерения сопротивления термометра, который подсоединяется к измерительному прибору соединительными проводами. Поэтому сопротивление, подключенное к измерительному прибору, больше, чем сопротивле-

ление термометра. Чтобы исключить или уменьшить влияние этого дополнительного сопротивления на результаты измерения, используют различные способы, которые зависят от схемы подключения термометра и метода измерения или схемы измерительного прибора. Сопротивление соединительных проводов должно с помощью подгоночного сопротивления быть подогнано до значения, при котором проводилась градуировка прибора. Градуировочное значение сопротивления соединительных проводов указывается на шкале прибора либо в его паспорте.

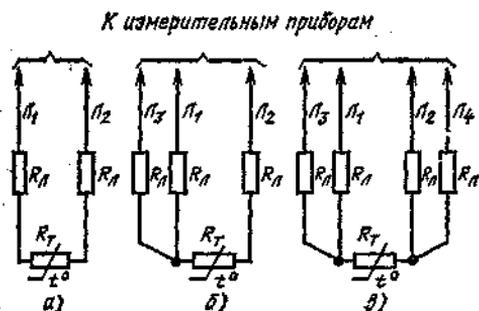


Рис. 6.4. Схемы подсоединения термометров сопротивления

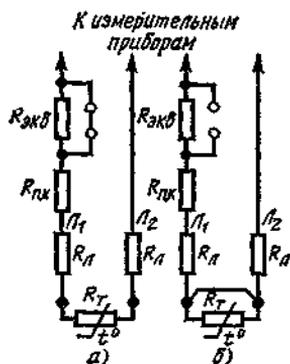


Рис. 6.5. Схема подгонки сопротивления соединительных проводов двухпроводной линии

Различают двух-, трех- и четырехпроводные схемы подсоединения термометров сопротивления к измерительному прибору (рис. 6.4). При *двухпроводной* схеме включения термометр сопротивления и сопротивление соединительных проводов последовательно включены в одну из ветвей измерительной схемы (рис. 6.4, а). Подгонка сопротивления соединительных проводов до градуировочного значения чаще всего осуществляется следующим обра-

зом. После того как собрана схема и проложены (смонтированы) соединительные провода, последовательно с термометром и соединительными проводами включаются подгоночная катушка  $R_{п.к}$  (рис. 6.5) и эквивалентное сопротивление  $R_{экв}$ . Значение эквивалентного сопротивления соответствует сопротивлению термометра при определенной температуре, например 100, 50 или 250 °С. Зажимы термометра закорачивают, и ветвь измерительной схемы состоит из сопротивления реальных соединительных проводов  $R_{л}$ , эквивалентного сопротивления, имитирующего сопротивление термометра при определенной температуре,  $R_{экв}$  и подгоночного сопротивления  $R_{п.к}$  (рис. 6.5, б). Затем включают измерительную схему и изменяют  $R_{п.к}$  до тех пор, пока измерительный прибор не встанет на отметку шкалы, соответствующую температуре, на которую рассчитано эквивалентное сопротивление. После этого эквивалентное сопротивление либо отключается, либо закорачивается, а закоротка с зажимов термометра снимается. Таким образом подгоняют сопротивление соединительных проводов термометра до расчетного (градуировочного) значения. Однако если в процессе эксплуатации температура соединительных проводов (как правило, медных) будет отличаться от их температуры при подгонке сопротивления, то и само сопротивление этих проводов будет отличаться от градуировочного значения. Погрешность, вызванная неправильностью подгонки или изменением сопротивления с температурой, независимо от диапазона измерения измерительного прибора для двухпроводной схемы подключения термометра может быть определена из выражения

$$\Delta t = (R_n^{эк} - R_n^{гр})/S, \quad (6.7)$$

где  $\Delta t$  — погрешность измерения, °С;  $R_n^{эк}$  — значение сопротивления линии (соединительных проводов) в условиях эксплуатации, Ом;  $R_n^{гр}$  — градуировочное (расчетное) значение сопротивления линии, Ом;  $S$  — коэффициент преобразования термометра в области измеряемой температуры, Ом/К.

Для уменьшения погрешности, вызываемой несоответствием сопротивления соединительных проводов градуировочному значению, применяют тер-

мометры с тремя выводами от термометра сопротивления в измерительную схему. При *трехпроводной схеме* подключения термометра (рис. 6.4, б) соединительные провода от головки термометра идут к измерительной ветви, сравнительной ветви и источнику питания. В симметричных уравновешенных схемах, когда сопротивления измерительной и сравнительной ветвей одинаковы, изменение температуры соединительных проводов не вызывает погрешности, так как сопротивление проводов изменяется на одну и ту же величину. Подгонка сопротивления соединительных проводов осуществляется последовательным измерением парно соединенных проводов.

*Четырехпроводная схема* подключения термометра (рис. 6.4, в) применяется, как правило, при компенсационном методе измерения сопротивления, который позволяет полностью исключить влияние изменения сопротивления соединительных проводов на показания прибора.

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

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

#### 6.4. Мостовые схемы измерения сопротивления

Для измерения сопротивлений термометров и других преобразователей сопротивления используются следующие методы и измерительные схемы: одно- и двух мостовые схемы (уравновешенные и неуравновешенные), логометры и компенсационный метод.

**Мостовые схемы.** Измерительный мост представляет собой (рис. 6.6) четыре резистора  $R_1, R_2, R_3$  и  $R_4$ , которые питаются от источника питания, включенного в питающую диагональ  $a-b$ . Напряжение источника питания составляет  $U$ . В измерительной диаго-

нали моста  $c-d$  включен измерительный прибор с сопротивлением  $R_r$ . Чтобы установить зависимость между значениями элементов схемы и измерительным током, воспользуемся теоремой об эквивалентном генераторе, согласно которой ток  $I_{cd}$  равен напряжению холостого хода  $U_{cd}$ , деленному на сумму сопротивлений участка  $cd$  и сопротивления между концами участка  $cd$  при коротком замыкании всех ЭДС

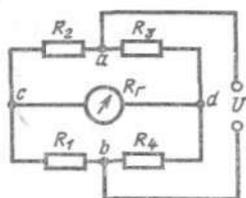


Рис. 6.6. Принципиальная схема моста

цепи. Таким образом, ток, протекающий через измерительный прибор в диагонали  $c-d$ , определяется формулой

$$\begin{aligned}
 I_{cd} &= \frac{U_{cd}}{R_r + R_{(c-d)к.з}} = \\
 &= \frac{U \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U \frac{R_3}{R_3 + R_4}}{R_r + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} = \\
 &= U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_r(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)} \quad (6.8)
 \end{aligned}$$

Из этого выражения вытекает, что возможны два режима работы моста:

1) равновесный, когда изменением сопротивления одного или нескольких резисторов добиваются выполнения условия  $I=0$ , которое имеет место, когда

$$R_1 R_3 = R_2 R_4, \quad (6.9)$$

2) неравновесный, когда

$$I = f(U, R_1, R_2, R_3, R_4, R_r). \quad (6.10)$$

В этом случае, если нужна однозначная зависимость измерительного тока от сопротивления какого-нибудь резистора, например  $R_3$ , необходимо, чтобы все остальные элементы схемы имели постоянные значения:  $U, R_1, R_2, R_4, R_r = \text{const}$ .

**Уравновешенные мосты.** В соответствии с режимами работы возникают схемные и конструктивные различия мостов. В мостах, использующих равновесный режим работы (уравнове-

енных мостах), для измерения сопротивления необходимо уравновесить мост — выполнить условие (6.9). Для этого одно или несколько плеч (резисторов) моста делаются переменными, сопротивления их могут быть определены. Тогда, добившись равновесия, по (6.9) и известным трем сопротивлениям определяется неизвестное (измеряемое) четвертое сопротивление. Момент наступления равновесия определяется по отсутствию тока в нуль-гальванометре. Наиболее простой является схема с одним изменяемым сопротивлением. Однако значительное влияние на результаты измерения по такой схеме может оказывать сопротивление переходного контакта переменного резистора. В связи с этим более рациональной является схема, в которой подвижный контакт входит в измерительную диагональ. В этом случае в момент равновесия ток в измерительной диагонали равен нулю и поэтому сопротивление переходного контакта не влияет на результаты измерения. Для уравновешивания моста изменяется сопротивление сразу двух плеч или соотношение сопротивлений плеч.

Рассмотрим схему автоматического уравновешенного моста, в котором уравновешивание осуществляется изменением сопротивления плеч (рис. 7). Автоматическое уравновешивание осуществляется так же, как и в автоматическом потенциометре. Если потенциалы вершин моста, к которым подключается измерительная диагональ, не равны, то в измерительной диагонали идет ток, который поступает на вход электронного усилителя ЭУ. Выходной сигнал заставляет вращать реверсивный двигатель, который перемещает движок реохорда  $R_p$  до тех пор, пока не наступит равновесие моста. Сопротивление  $R_p$  рассчитывается и изготавливается таким образом, чтобы при изменении измеряемой температуры от минимального до максимального значения для уравновешивания моста движок реохорда должен переместиться от одного крайнего положения до другого. Параметр  $m$  определяет положение движка в долях от  $R_p$ .

Измеряемое сопротивление (термометр) включено в плечо, прилежащее к реохорду. В этом случае уравнение шкалы — перемещение движка реохорда в зависимости от изменения сопро-

тивления — будет линейно. Запишем уравнения равновесия для начальной и промежуточной точек и получим уравнение шкалы:

$$\left. \begin{aligned} (R_{T.нач} + \Delta R_T + R_p - mR_p) R_2 &= \\ &= (R_1 + mR_p) R_3; \\ (R_{T.нач} + R_p) R_2 &= R_1 R_3, \end{aligned} \right\} (6.11)$$

$$\text{откуда } m = \Delta R_T \frac{R_2}{R_p (R_2 + R_3)}.$$

Как видно из выражения, показания моста  $m$  пропорциональны изменению сопротивления  $\Delta R_T$ . При включении измеряемого сопротивления в плечо, прилежащее к реохорду, уравнение шкалы уравновешенного моста получается линейным относительно изменения сопротивления. Этот вариант схемы получил наибольшее распространение. В этой схеме термометр сопротивления включен по трехпроводной схеме. Если возникает необходимость подключить сопротивление по двухпроводной схеме, для этого достаточно перенести питающую диагональ из точки 2 в точку 3. Представленная схема имеет следующие преимущества: 1) показания моста не зависят от напряжения питания (это преимущество присуще всем уравновешенным мостам); 2) показания прибора линейно связаны с изменением измеряемого параметра; 3) измерение (уравновешивание моста) осуществляется автоматически; 4) трехпроводная схема включения позволяет существенно уменьшить или даже исключить погрешность показаний, вызываемую изменением сопротивления соединительных проводов. К числу недостатков схемы следует отнести: 1) необходимость в схеме устройства для уравновешивания; 2) трудность или невозможность измерения малых сопротивлений.

Как уже указывалось, при использовании двухпроводной схемы подключения термометров к измерительному прибору любое изменение сопротивления соединительных проводов относительно расчетного (градуировочного) значения непосредственно будет влиять на показания прибора, причем погрешность будет пропорциональна изменению сопротивления. Для уменьшения этого влияния сопротивления отдельных соединительных проводов включаются в разные ветви мостовой схемы — в измерительное плечо, в прилежащее постоянное плечо и в питаю-

енных мостах), для измерения сопротивления необходимо уравновесить мост — выполнить условие (6.9). Для этого одно или несколько плеч (резисторов) моста делаются переменными, сопротивления их могут быть определены. Тогда, добившись равновесия, по (6.9) и известным трем сопротивлениям определяется неизвестное (измеряемое) четвертое сопротивление. Момент наступления равновесия определяется по отсутствию тока в нуль-гальванометре. Наиболее простой является схема с одним изменяемым сопротивлением. Однако значительное влияние на результаты измерения по такой схеме может оказывать сопротивление переходного контакта переменного резистора. В связи с этим более рациональной является схема, в которой подвижный контакт входит в измерительную диагональ. В этом случае в момент равновесия ток в измерительной диагонали равен нулю и поэтому сопротивление переходного контакта не влияет на результаты измерения. Для уравновешивания моста изменяется сопротивление сразу двух плеч или соотношение сопротивлений плеч.

Рассмотрим схему *автоматического уравновешенного моста*, в котором уравновешивание осуществляется изменением сопротивления плеч (рис. 6.7). Автоматическое уравновешивание осуществляется так же, как и в автоматическом потенциометре. Если потенциалы вершин моста, к которым подключается измерительная диагональ, не равны, то в измерительной диагонали идет ток, который поступает на вход электронного усилителя ЭУ. Выходной сигнал заставляет вращаться реверсивный двигатель, который перемещает движок реохорда  $R_p$  до тех пор, пока не наступит равновесие моста. Сопротивление  $R_p$  рассчитывается и изготавливается таким образом, что при изменении измеряемой температуры от минимального до максимального значения для уравновешивания моста движок реохорда должен переместиться от одного крайнего положения до другого. Параметр  $m$  определяет положение движка в долях от  $R_p$ .

Измеряемое сопротивление (термометр) включено в плечо, прилежащее к реохорду. В этом случае уравнение шкалы — перемещение движка реохорда в зависимости от изменения сопро-

тивления — будет линейно. Запишем уравнения равновесия для начальной и промежуточной точек и получим уравнение шкалы:

$$\left. \begin{aligned} (R_{\text{т.нач}} + \Delta R_{\text{т}} + R_p - mR_p) R_2 &= \\ &= (R_1 + mR_p) R_3; \\ (R_{\text{т.нач}} + R_p) R_2 &= R_1 R_3, \end{aligned} \right\} (6.11)$$

$$\text{откуда } m = \Delta R_{\text{т}} \frac{R_2}{R_p (R_2 + R_3)}.$$

Как видно из выражения, показания моста  $m$  пропорциональны изменению сопротивления  $\Delta R_{\text{т}}$ . При включении измеряемого сопротивления в плечо, прилежащее к реохорду, уравнение шкалы уравновешенного моста получается линейным относительно изменения сопротивления. Этот вариант схемы получил наибольшее распространение. В этой схеме термометр сопротивления включен по трехпроводной схеме. Если возникает необходимость подключить сопротивление по двухпроводной схеме, для этого достаточно перенести питающую диагональ из точки 2 в точку 3. Представленная схема имеет следующие преимущества: 1) показания моста не зависят от напряжения питания (это преимущество присуще всем уравновешенным мостам); 2) показания прибора линейно связаны с изменением измеряемого параметра; 3) измерение (уравновешивание моста) осуществляется автоматически; 4) трехпроводная схема включения позволяет существенно уменьшить или даже исключить погрешность показаний, вызываемую изменением сопротивления соединительных проводов. К числу недостатков схемы следует отнести: 1) необходимость в схеме устройства для уравновешивания; 2) трудность или невозможность измерения малых сопротивлений.

Как уже указывалось, при использовании двухпроводной схемы подключения термометров к измерительному прибору любое изменение сопротивления соединительных проводов относительно расчетного (градуировочного) значения непосредственно будет влиять на показания прибора, причем погрешность будет пропорциональна изменению сопротивления. Для уменьшения этого влияния сопротивления отдельных соединительных проводов включаются в разные ветви мостовой схемы — в измерительное плечо, в прилежащее постоянное плечо и в питаю-

шую диагональ (рис. 6.7). В этом случае уменьшается вдвое сопротивление проводов, входящее вместе с термометром в измерительное плечо моста, и поэтому возможная погрешность измерения частично уменьшается. Кроме того, сопротивления соединительных проводов оказываются включенными в прилежащие плечи моста, входящие в разные стороны равенства (6.9). Поэтому изменение сопротивления этих проводов будет меньше влиять на показания, чем при двухпроводной схеме, а при симметричном мосте, когда  $R_3 = R_1 + R_p - mR_p$ , это влияние будет полностью отсутствовать.

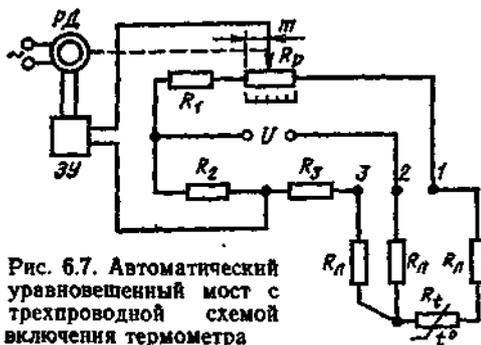


Рис. 6.7. Автоматический уравновешенный мост с трехпроводной схемой выключения термометра

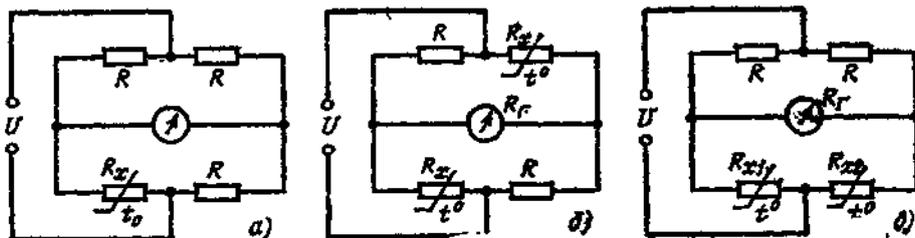


Рис. 6.8. Схемы неуравновешенного моста:

а — с одним измеряемым сопротивлением; б — с двумя измеряемыми сопротивлениями, включенными в противолежащие плечи; в — с двумя измеряемыми сопротивлениями, включенными в прилежащие плечи

В настоящее время выпускаются миниатюрные показывающие мосты КВМ1 с вращающейся шкалой класса 0,25 и 0,5 и показывающие стрелочные мосты КПМ1 класса 0,5, а также миниатюрные показывающие и самопишущие мосты КСМ1 класса 1 с диаграммной лентой шириной 100 мм и быстродействием (временем пробега указателем всей шкалы) 2,5 и 5 с. Малогабаритные приборы показывающие и самопишущие типа КСМ2 (с ленточной диаграммой) и КСМ3 (с дисковой диаграммой) выпускаются класса 0,5 (КСМ3 также класса 0,25) с шириной диаграммы 160 мм и быстродействием 2,5 и 10 с (для КСМ3 также 1 с). Скорость движения диаграммной ленты для КСМ2 может иметь разные значения (20—2000 мм/ч), время оборота диаграммы для КСМ3 составляет 24 ч.

Полногабаритные мосты типа КСМ4 выпускаются класса точности 0,25 с ленточной ди-

аграммой шириной 250 мм и скоростью движения диаграммы от 20 до 54 000 мм/ч, одно- и многоточечные; быстродействие 1; 2,5 и 10 с. Сопротивление каждого провода линии связи для каждого типа прибора может иметь свой значение, выбираемое из ряда 2,5; 7,5; 10 и 15 Ом.

**Неуравновешенные мосты.** Неуравновешенные мосты для измерения температуры с термометрами сопротивления применяются редко. Однако они нашли широкое применение для измерения сопротивления в газоанализаторах, концентратомерах и ряде других средств измерения. Зависимость тока, протекающего через измерительный прибор, в диагонали моста от сопротивлений резисторов схемы и напряжения питания представлена выражением (6.8). В неуравновешенных мостах в процессе эксплуатации нет необходимости производить какие-либо изменения сопротивлений или переключения. Показания измерительного прибора рассчитаны или отградуированы сразу в значениях измеряемого сопротивления или параметра, влияющего на сопротивление. Как видно из (6.8), зависимость измерительного тока от измеряемого сопротивления будет одно-

значной только тогда, когда все остальные элементы схемы не изменяют своих значений, причем вид этой зависимости нелинейный. Например, для случая, когда измеряемое сопротивление  $R_1 = R_x$ , а все остальные плечи моста равны:  $R_2 = R_3 = R_4 = R$  (рис. 6.8, а), уравнение шкалы будет иметь вид

$$I_1 = U \frac{R_x - R}{R_x(2R_r + 3R) + R(2R_p + R)} \quad (6.12)$$

При измерении очень малых сопротивлений или малых изменений сопротивлений возникает необходимость увеличить коэффициент преобразования

схемы моста. Для этого два аналогичных преобразователя сопротивления, находящихся в одинаковых условиях, включают в противоположные плечи моста (рис. 6.8, б). Уравнение шкалы в этом случае будет иметь вид

$$I_2 = U \frac{R_x - R}{R_x(R_r + 2R) + R_r R} \approx 2I_1, \quad (6.13)$$

т.е. при использовании двух аналогичных преобразователей сопротивления коэффициент преобразования измерительной схемы увеличивается примерно в 2 раза.

Во многих случаях возникает необходимость получать сигнал, определяемый разностью сопротивлений двух преобразователей. Для этого преобразователи включаются в прилежащие плечи неуравновешенного моста (рис. 6.8, в). Уравнение шкалы в этом случае имеет вид

$$I = U \frac{R_{x_1} - R_{x_2}}{2R_r(R_{x_1} + R_{x_2}) + R(R_{x_1} + R_{x_2}) + 2R_{x_1}R_{x_2}} \approx k(R_{x_1} - R_{x_2}), \quad (6.14)$$

Сила тока  $I$  практически пропорциональна разности сопротивлений преобразователей  $R_{x_1} - R_{x_2}$ . Схемы неуравновешенных мостов с двумя измеряемыми сопротивлениями (рис. 6.8, б и в) находят широкое применение в измерительных схемах газоанализаторов, концентратометров, влагомеров и других приборов.

В схемах неуравновешенных мостов в случае необходимости может быть применена трехпроводная схема подключения измеряемого сопротивления, которая позволяет уменьшить или исключить влияние изменения соединительных проводов на показания моста.

К преимуществам неуравновешенных мостов следует отнести простоту схемы, не требующую устройств уравновешивания; возможность применения для измерения малых сопротивлений (за счет уменьшения или даже исключения сопротивления проводников, соединяющих плечи моста). К недостаткам неуравновешенных мостов относятся зависимость показаний от изменения напряжения питания; нелинейность шкалы моста.

Для использования одновременно положительных качеств как уравновешенных, так и неуравновешенных мостов разработана двухмостовая компенсационная измерительная схе-

ма, которую иногда называют схемой компаратора напряжений (рис. 6.9).

Двухмостовая компенсационная измерительная схема. Схема состоит из измерительного  $I$  и сравнительного  $II$  мостов, питаемых параллельно от одного источника питания. В измерительном мосте одно или два сопротивления представляют собой измерительные преобразователи, так что при изменении их сопротивления относительно начального возникает разность потенциалов, определяемая выражением для  $R_1 = R_x$

$$U_{ab} = U \frac{R_x R_3 - R_2 R_4}{(R_x + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (6.15)$$

или для двух преобразователей сопротивления, когда  $R_1 = R_x$  и  $R_3 = R_x$ , а  $R_2 = R_4 = R_{\text{мин}}$ ,

$$U_{ab}^* = U \frac{R_x^2 - R_2 R_4}{(R_x + R_2)^2}. \quad (6.16)$$

В сравнительном мосте сопротивления  $R_5 - R_8$  постоянны и подобраны таким образом, что  $R_6 = R_8 = R_{\text{мин}}$ , а  $R_5 =$

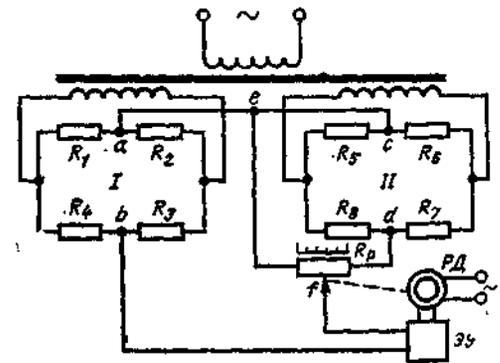


Рис. 6.9. Двухмостовая компенсационная измерительная схема

$= R_7 = R_{\text{макс}}$ . Разность потенциалов  $U_{cd}$  в этом случае будет равна  $U_{ab\text{макс}}$  — той разности потенциалов, которая будет между точками  $a$  и  $b$ , когда  $R_1 = R_3 = R_{\text{макс}}$ :

$$U_{cd} = U \frac{R_5 R_7 - R_6 R_8}{(R_5 + R_6)(R_7 + R_8)} = U \frac{R_{\text{мин}}^2 - R_6 R_8}{(R_{\text{макс}} + R_{\text{мин}})^2}. \quad (6.17)$$

Схема построена таким образом, что на реохорде  $R_p$ , выполняющем функцию делителя напряжения, происходит компенсация (уравновешивание) разности потенциалов  $U_{ab}$  такой долей от

разности потенциалов  $U_{cd}$ , что  $U_{ef} = U_{ab}$ . Если компенсация не выполнена, то  $U_{ef} \neq U_{ab}$  и на вход усилителя поступает сигнал, который заставляет перемещаться реверсивный двигатель до тех пор, пока не наступит компенсация, т. е.  $U_{ef}$  не будет равно  $U_{ab}$ . Работа двухмостовой компенсационной схемы практически не зависит от колебания напряжения питания, так как при изменении напряжения питания  $U$  изменяется разность потенциалов  $U_{ab}$  и также изменяется  $U_{cd}$ . В точке, соответствующей конечной (максимальной) отметке шкалы, изменение напряжения питания даже теоретически не будет влиять [см. (6.16) и (6.17)]. Во всех остальных точках влияние будет, но им можно пренебречь. Двухмостовая компенсационная схема имеет практически линейную шкалу. Хотя каждый сигнал  $U_{ab}$  и  $U_{cd}$  нелинейно связан со значением сопротивления преобразователя, один из них уравнивается другим и поэтому положение движка реохорда (делителя напряжения) практически линейно связано с изменением сопротивления.

Двухмостовая схема позволяет измерять очень малые значения или малые изменения сопротивления одного или двух плеч. При использовании двухмостовой схемы в газоанализаторах, влагомерах и других приборах появляются также другие преимущества, характерные для конкретных методов и средств измерения.

### 6.5. Логометры

Магнитоэлектрический логометр является одним из средств измерения, часто применяемых в комплекте с техническими термометрами сопротивления для измерения температуры. Принцип действия логометра (логос — отношение) основан на измерении отношения токов в двух электрических цепях. В одну из них включен термометр сопротивления, а в другую — постоянное сопротивление. На рис. 6.10 представлена схема магнитоэлектрического логометра, который состоит из двух рамок 1 и 2, жестко скрепленных друг с другом и со стрелкой 3 и помещенных в воздушном зазоре между полюсными наконечниками 4 и 5 постоянного магнита 6 и сердечником 7. Этот зазор сделан неравномерным, и поэтому значение магнитной индукции

в разных точках зазора (при разном угле поворота рамок и стрелки) будет различным. Воздушный зазор уменьшается от центра к краям полюсных наконечников и соответственно от центра к краям полюсных наконечников возрастает магнитная индукция в зазоре.

Обе рамки логометра питаются от одного источника постоянного тока  $E$  и включены таким образом, что их вращающие моменты направлены навстречу друг другу. Значения вращающих моментов  $M_1$  и  $M_2$  могут быть определены из выражения (5.18):

$$M_1 = 2r_1 n_1 l_1 B_1 I_1; \quad (6.18)$$

$$M_2 = 2r_2 n_2 l_2 B_2 I_2. \quad (6.19)$$

Подвижная система будет находиться в равновесии, когда моменты

$$M_1 = M_2. \quad (6.20)$$

Как правило,  $r_1 = r_2$ ,  $n_1 = n_2$  и  $l_1 = l_2$ , тогда выражение (6.20) принимает вид

$$B_1 I_1 = B_2 I_2,$$

или

$$I_1/I_2 = B_2/B_1. \quad (6.21)$$

Отношение магнитных индукций  $B_2/B_1$  для конкретной конструкции логометра

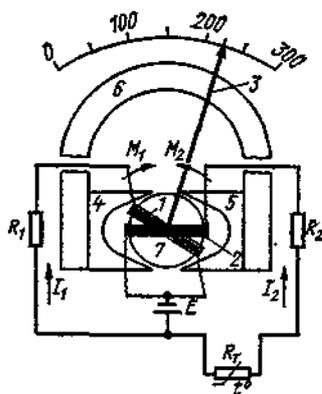


Рис. 6.10. Схема магнитоэлектрического логометра

ра зависит от положения рамок, т. е. однозначно определяется углом их поворота  $\varphi$ :

$$B_2/B_1 = f(\varphi). \quad (6.22)$$

Отношение токов  $I_1/I_2$  зависит от сопротивлений резисторов двух ветвей цепи.

Обе ветви электрической цепи питаются параллельно от одного источника питания  $E$ . В сопротивление одной из



твением потенциометров мало, широкое распространение получил компенсационный метод измерения. Сущность компенсационного метода измерения сопротивления заключается в том, что производится сравнение падения напряжения на измеряемом резисторе и на образцовом резисторе, включенном последовательно с измеряемым (рис. 6.12). Измерение падения напряжения на резисторах осуществляется, как правило, потенциометром. В этом случае напряжение питания не влияет на результаты измерения, а также полностью исключается влияние сопротивления соединительных проводов, так как в момент измерения ток в проводах, соединяющих потенциометр с измеряемым резистором, равен нулю.

Для удобства применения компенсационного метода измеряемые и образцовые резисторы имеют четыре вывода: два токовых — для подключения питания и два потенциальных — для подключения потенциометра.

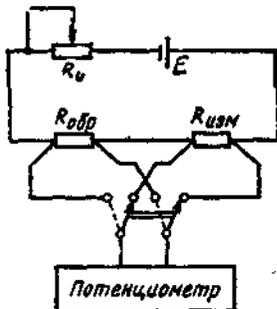


Рис. 6.12. Схема компенсационного метода измерения сопротивлений

На схеме рис. 6.12 измеряемый резистор  $R_{изм}$  включен последовательно с образцовым резистором  $R_{обр}$ . В качестве образцового резистора используются магазины сопротивлений или образцовые катушки сопротивлений. Измеряемый ток в цепи устанавливают переменным резистором  $R_T$ . Значение тока выбирается таким образом, чтобы самонагрев термометра сопротивления не вызвал изменения температуры термометра больше допустимого.

С одной стороны, ток определяется по падению напряжения на образцовом резисторе:

$$I = U_{обр} / R_{обр}, \quad (6.26)$$

где  $U_{обр}$  — падение напряжения на образцовом резисторе, мВ;  $R_{обр}$  — сопротивление образцового резистора, Ом.

С другой стороны

$$I = U_{изм} / R_{изм}, \quad (6.27)$$

где  $U_{изм}$  — падение напряжения на измеряемом резисторе, мВ;  $R_{изм}$  — неизвестное сопротивление измеряемого резистора, Ом.

Исходя из (6.31) и (6.32), получаем сопротивление измеряемого резистора

$$R_{изм} = R_{обр} U_{изм} / U_{обр}. \quad (6.28)$$

В рассмотренном варианте компенсационный метод неудобен для технических измерений, так как для определения сопротивления резистора необходимо поочередно измерить падение напряжения на измеряемом и образцо-

вом резисторах и затем рассчитать по (6.28) сопротивление измеряемого резистора. Но в лабораторных условиях эти операции не представляют особого труда, тем более что этот метод может обеспечить высокую точность измерения сопротивлений.

При измерении высоких температур платиновыми термометрами градуировки 1П или криогенных температур термометрами градуировки 100П или 500П на промышленных установках возникает необходимость измерять сопротивления, соизмеримые с сопротивлениями соединительных проводов. Для технических измерений малых сопротивлений термометрами разработаны автоматические компенсационные приборы, которые обладают положительными свойствами компенсационного метода измерения сопротивлений. Четырехпроводная схема включения термометра позволила полностью исключить влияние на результаты измерения сопротивления проводов.

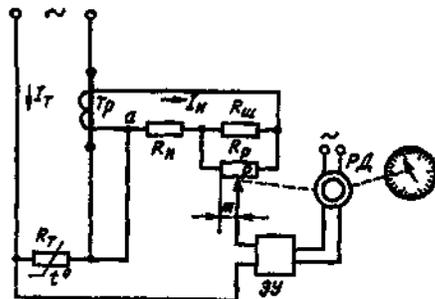


Рис. 6.13. Схема автоматического компенсационного прибора для измерения малых сопротивлений

Принципиальная схема автоматического компенсационного прибора переменного тока для измерения и записи низких температур приведена на рис. 6.13 [1]. Термометр сопротивления  $R_T$  питается от источника питания переменным током  $I_T$ . Измерительная схема прибора питается от трансформатора тока  $T_p$  таким образом, что измерительный ток  $I_n = kI_T$ . Если падение напряжения на термометре не скомпенсировано напряжением  $U_{аб}$ , то на вход усилителя поступает сигнал, который заставляет перемещаться реверсивный двигатель и движок реохорда  $R_p$  до тех пор, пока напряжение  $U_{аб}$  не уравновесит падение напряжения на  $R_T$ . В этом случае будет выполнено равенство

$$I_T R_T = U_{аб} = I_n R_{об} \\ \text{или} \\ I_T R_T = kI_T (R_n + mR_{пр}), \quad (6.29)$$

где

$$R_{пр} = \frac{R_p R_m}{R_p + R_m}; \\ R_T = k(R_n + mR_{пр}). \quad (6.30)$$

Резистор  $R_n$  служит для установки начала шкалы прибора, а  $R_m$  устанавливает диапазон измерения. Полагая коэффициент трансформации  $k$  практически постоянным, можно считать, что показания прибора  $m$  практически независимы от колебания напряжения питания и изменения сопротивления соединительных проводов термометра.

## 7.1. Общие сведения

Все рассмотренные выше термометры для измерения температуры (термометры расширения, термоэлектрические и сопротивления) предусматривают непосредственный контакт между чувствительным элементом термометра и измеряемым телом или средой. Поэтому такие методы измерения температуры иногда называются контактными. Верхний предел применения контактных методов ограничивается значениями 1800—2200 °С. Однако в ряде случаев в промышленности и при исследованиях возникает необходимость измерять более высокие температуры. Кроме того, часто недопустим непосредственный контакт термометра с измеряемым телом или средой. В этих случаях применяются бесконтактные средства измерения температуры, которые измеряют температуру тела или среды по тепловому излучению. Такие средства измерения называются *пирометрами*. Серийно выпускаемые пирометры применяются для измерения температур от 20 до 6000 °С.

Бесконтактные методы измерения теоретически не имеют верхнего предела измерения и возможности их использования определяются соответствием спектров излучения измеряемых тел или сред и спектральных характеристик пирометров. Если для каких-либо условий могут быть использованы и контактные и бесконтактные методы измерения, то, как правило, предпочтение следует отдать контактному, так как они позволяют обеспечить более высокую точность измерения.

## 7.2. Основы теории измерения температуры тел по излучению

Все тела излучают электромагнитные волны различной длины  $\lambda$  или частоты  $\nu$ . Электромагнитное излучение, возбуждаемое тепловым движением молекул, называют тепловым излучением. Это излучение имеет место при температурах до 4000 °С как результат колебательного или вращательного движения молекул. При более высоких температурах излучение вызывается в

основном процессами диссоциации и ионизации.

Если излучение какого-либо тела падает на другое, непрозрачное для этого излучения тело, то оно поглощается на поверхности и превращается в теплоту. Вообще процессы поглощения и излучения взаимнообратимы. Лучи, падающие извне на поверхность тела, могут полностью или частично отражаться от поверхности, поглощаться телом, проходить через тело.

Отношение отраженного, поглощенного и пропущенного потока излучения к падающему на тело потоку излучения называется соответственно коэффициентами отражения  $\rho = \Phi_{\text{отр}}/\Phi_0$ , поглощения  $\alpha = \Phi_{\text{п}}/\Phi_0$  и пропускания  $\tau = \Phi_{\text{пр}}/\Phi_0$ . Для монохроматического излучения (излучения с определенной длиной волны) эти коэффициенты называются соответственно спектральными коэффициентами отражения  $\rho_\lambda$ , поглощения  $\alpha$  и пропускания  $\tau_\lambda$ . Они зависят от материала тела, способа обработки, состояния поверхности, температуры и ряда других факторов. Между ними существуют следующие соотношения:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \text{ и } \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad (7.1)$$

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется абсолютно черным телом. По закону Кирхгофа отношение спектральной энергетической яркости любого источника теплового излучения  $B_{\lambda T}$  к его спектральному коэффициенту поглощения  $\alpha_{\lambda T}$  равно спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела  $B_{\text{ол}T}$  при одной и той же длине волны  $\lambda$  и температуре  $T$ :

$$B_{\lambda T} / \alpha_{\lambda T} = B_{\text{ол}T}. \quad (7.2)$$

Энергетическая яркость тела  $B_T$  при температуре  $T$  может быть определена по спектральной энергетической яркости при интегрировании по всему диапазону длин волн

$$B_T = \int_0^\infty B_{\text{ол}T} d\lambda. \quad (7.3)$$

В табл. 7.1 приведены величины и постоянные, применяемые в пирометрии

Таблица 7.1. Величина и постоянные, применяемые в пирометрии излучения

Величина или постоянная	Обозначение	Определение
Энергия излучения, Дж	$W$	Энергия излучения, эквивалентная работе в 1 Дж
Поток излучения, Вт	$\Phi = dW/d\tau$	Поток излучения, эквивалентный мощности в 1 Вт
Энергетическая сила света, Вт/ср	$I = d\Phi/d\Omega$	Энергетическая сила света, создающая в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт
Энергетическая яркость, Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	$B = dI/df$	Энергетическая яркость тела, перпендикулярно поверхности которого площадью 1 м <sup>2</sup> испускается свет энергетической силой 1 Вт/ср
Спектральная энергетическая яркость, Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	$B_\lambda = dB/d\lambda$	Спектральная энергетическая яркость тела, при которой в диапазоне длин волн 1 м равномерно распределена энергетическая яркость 1 Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)
Постоянная Планка, Дж·с	$h$	$h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Больцмана, Дж/К	$k$	$k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Скорость света в вакууме, км/с	$c$	$c = 2,997925 \cdot 10^8$ м/с (300 000 км/с)
Первая постоянная излучения, Вт·м <sup>2</sup>	$C_1 = 2\pi h c$	$C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16}$ Вт·м <sup>2</sup>
Вторая постоянная излучения, м·К	$C_2 = h c/k$	$C_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$ м·К
Постоянная Стефана — Больцмана, Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	$\sigma$	$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )

излучения. Закон Планка устанавливает следующее соотношение между абсолютной температурой  $T$  и спектральным распределением энергетической яркости тела:

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (7.4)$$

где  $C_1, C_2$  — первая и вторая постоянные излучения (см. табл. 7.1);  $\lambda$  — длина волны, м;  $T$  — абсолютная температура, К. Для малых значений  $\lambda T < 2 \cdot 10^{-3}$  м·К формула Планка (7.4) может быть заменена формулой Вина

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right). \quad (7.5)$$

Для больших значений  $\lambda T > 0,2$  м·К формула Планка может быть заменена формулой Релея—Джинса

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi C_2} \lambda^{-4} T. \quad (7.6)$$

На рис. 7.1 представлена зависимость спектральной плотности излучения  $M_{0\lambda T}$  абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  для различных значений температуры, построенная по закону Планка (7.4), где  $M_{0\lambda T} = B_{0\lambda T} \pi$ . Анализ этих значений показывает, что изотеры спектрального распределения плотности излучения имеют максимум, зависящий от температуры. Согласно

закону смещения Вина положение максимума определяется произведением  $\lambda_{\text{макс}} T = 0,28978 \cdot 10^{-2}$  м·К. Поэтому с увеличением температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн.

В видимой области спектра (0,4—0,7 мкм) темп роста спектральной плотности излучения от температуры очень высок (рис. 7.2). Например, при  $\lambda = 0,4$  мкм увеличение температуры от

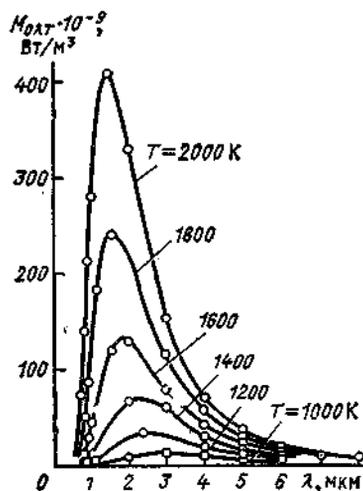


Рис. 7.1. Спектральное распределение плотности излучения для различных значений температуры

1000 до 2000 К вызывает изменение спектральной плотности излучения примерно в  $10^8$  раз. При увеличении длины волны этот рост уменьшается (при  $\lambda=0,7$  мкм то же самое увеличение температуры вызывает изменение спектральной плотности излучения уже только в  $10^4$  раз).

Как следствие закона Планка при интегрировании спектральной плотности излучения абсолютно черного тела по длинам волн от нуля до бесконечности получаем закон Стефана-Больцмана для интегральной энергетической яркости, Вт/(м<sup>2</sup>·ср),

$$B_{0T} = \int_0^{\infty} B_{0\lambda T} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda = \frac{\sigma}{\pi} T^4, \quad (7.7)$$

Фактически  $B_{0T}$  характеризует мощность излучения в телесном угле, равном 1 стерadianу.

Все законы излучения (7.4)–(7.7) установлены для абсолютно черного тела. Реальные тела имеют меньшую излучательную способность, которая определяется коэффициентом поглощения  $\alpha_{\lambda T}$  или коэффициентом теплового излучения  $\epsilon_{\lambda T}$  (см. 7.2), зависящими, как правило, от длины волны излучения и температуры тела. Многие реальные тела по своим излучательным способностям близки к серым телам. Серым телом называют тело, коэффициент поглощения которого не равен 1, но не зависит от длины волны и температуры.

### 7.3. Методы измерения температуры тел по излучению

Существует большое число различных методов измерения температуры тел по излучению, но для измерения высоких температур в реальных технологических процессах применяются следующие типы пирометров: квазимонохроматический, полного излучения и спектрального отношения. В ряде случаев в связи с техническими трудностями реализации метода полного излучения применяются пирометры частичного излучения. Если посмотреть на графическую интерпретацию закона Планка (рис. 7.1), то можно

отчетливо представить принципы измерения различных типов пирометров.

Если на рис. 7.1 провести линию  $\lambda = \text{const}$ , то можно видеть, что каждой температуре будет соответствовать своя спектральная плотность излучения. Аналогично можно установить зависимость от температуры при  $\lambda = \text{const}$  и для спектральной энергетической яркости. Темпы изменения спектральной плотности излучения или спектральной энергетической яркости можно оценить из рис. 7.2. Пирометр, действие которого основано на использовании зависимости температуры от спектральной энергетической яркости, описываемой формулой Планка, называется *квазимонохроматическим пирометром*.

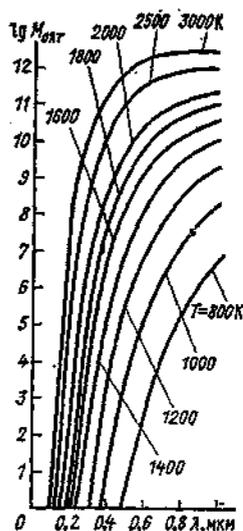


Рис. 7.2. Спектральное распределение плотности излучения в видимой части спектра и вблизи нее

Если взять отношение спектральных энергетических яркостей при двух длинах волн  $\lambda_1 = \text{const}$  и  $\lambda_2 = \text{const}$ , то можно заметить, что это отношение будет изменяться с изменением температуры. Это изменение вызвано тем, что с изменением температуры смещается максимум излучения и соответственно изменяется соотношение спектральных энергетических яркостей для двух фиксированных длин волн. Пирометр, действие которого основано на использовании зависимости от температуры тела отношения спектральной энергетической яркости для двух (или более) фиксированных длин волн, называется *пирометром спектрального отношения*.

Если проинтегрировать спектральную энергетическую яркость при  $T = \text{const}$  по длинам волн от 0 до  $\infty$ , то

получим значение энергетической яркости (7.7), которое будет характеризоваться площадью под соответствующей изотермой (рис. 7.1). Этот интеграл (или площадь под изотермой) будет изменять свое значение в зависимости от температуры. Пирометр, действие которого основано на использовании зависимости температуры от интегральной энергетической яркости излучения, описываемой для абсолютно черного тела законом Стефана—Больцмана, называется *пирометром полного излучения*.

На практике трудно осуществить такой приемник излучения, который поглощал бы излучение всех длин волн от 0 до  $\infty$ . В связи с этим часто применяются пирометры с приемниками, воспринимающими излучение в интервале длин волн от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ . Пирометр, действие которого основано на зависимости от температуры энергетической яркости излучения в ограниченном интервале длин волн, называется *пирометром частичного излучения*.

В связи с тем что излучательные способности реальных тел очень разнообразны и зависят от температуры, длины волны и состояния поверхности тел, производить градуировку пирометров излучения по реальным телам не представляется возможным. Поэтому практически все пирометры излучения градуируются по черному излучателю, излучательные свойства которого близки к свойствам абсолютно черного тела. При измерении температуры реальных тел пирометры, отградуированные по черному излучателю, показывают какую-то условную псевдотемпературу, причем отличие псевдотемпературы от действительной тем больше, чем больше отличаются излучательные способности реального тела от излучательных способностей абсолютно черного тела. Рассмотрим, в какой взаимосвязи находятся псевдотемпературы и действительные температуры тела при различных методах измерения. В квазимонохроматическом пирометре температура тела определяется по спектральной энергетической яркости излучения. Предположим, что  $T$ —действительная температура измеряемого реального нечерного тела. Тогда спектральная энергетическая яркость этого тела будет  $B_{\lambda T}$ . Так как пирометр градуировался по излучению черного тела, то он покажет темпера-

туру абсолютно черного тела  $T_n$ , при которой спектральные энергетические яркости реального тела  $B_{\lambda T}$  и абсолютно черного тела  $B_{\lambda T_n}$  будут равны. Условная псевдотемпература  $T_n$  называется яркостной температурой тела. Яркостной температурой реального тела называется такая температура абсолютно черного тела  $T_n$ , при которой спектральные энергетические яркости абсолютно черного тела  $B_{\lambda T_n}$  при температуре  $T_n$  и реального тела  $B_{\lambda T}$  при температуре  $T$  равны. Согласно (7.2) можно записать, что  $B_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} B_{\lambda T}$  или  $B_{\lambda T} = \epsilon_{\lambda T} B_{\lambda T}$ , но, с другой стороны,  $B_{\lambda T} = B_{\lambda T_n}$ , откуда

$$B_{\lambda T_n} = \epsilon_{\lambda T} B_{\lambda T}. \quad (7.8)$$

Подставив значения  $B_{\lambda T_n}$  и  $B_{\lambda T}$  из (7.5), получим

$$\frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_n}} = \epsilon_{\lambda T} \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}.$$

После несложных преобразований имеем

$$\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_1} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}} \quad (7.9)$$

или

$$T = \frac{T_n}{1 + a T_n}, \quad (7.10)$$

где

$$a = \frac{\lambda}{C_1} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}.$$

Это выражение устанавливает связь между действительной температурой тела  $T$  и яркостной температурой  $T_n$ , показываемой пирометром. Следует заметить, что для определения действительной температуры тела по яркостной температуре необходимо знать длину волны  $\lambda$  и коэффициент теплового излучения  $\epsilon_{\lambda T}$ . Длина волны, при которой работают большинство квазимонохроматических пирометров,  $\lambda = 0,65$  мкм. Что касается  $\epsilon_{\lambda T}$ , то для каждого материала он имеет свое значение, которое может изменяться в зависимости от состояния поверхности и температуры в несколько раз. Поэтому в каждом конкретном случае желательно с помощью других средств измерения или других устройств уточнить коэффициент теплового излучения. В табл. 7.2 даны некоторые значения  $\epsilon_{\lambda}$ . Из таблицы видно, насколько существенно может измениться  $\epsilon_{\lambda}$  для одного и того же материала в за-

Таблица 7.2. Монохроматический коэффициент черноты некоторых тел при  $\lambda = 0,65$  мкм

Материал	Коэффициент черноты для поверхности	
	неокисленной	окисленной
Сталь углеродистая твердая	0,45	0,80
Сталь углеродистая жидкая	0,37	—
Железо твердое	0,32—0,43	0,50—0,95
Железо жидкое	0,41—0,50	0,55—0,95
Медь твердая	0,11—0,20	0,20—0,35
Медь жидкая	0,12—0,19	—
Вольфрам	0,43	—
Графит	0,80—0,96	—
Фарфор	0,26—0,50	—
Шлаки жидкие	0,75—0,95	—

зависимости от степени окисленности поверхности.

В пирометре спектрального отношения температура тела определяется по отношению спектральных энергетических яркостей для двух длин волн. Предположим, что действительная температура реального тела  $T$ . Тогда отношение спектральных энергетических яркостей при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  будет  $B_{\lambda_1 T} / B_{\lambda_2 T}$ . Так как пирометр градуировался по излучению черного тела, то он покажет температуру абсолютно черного тела  $T_{\text{ц}}$ , при которой отношение спектральных энергетических яркостей реального тела и абсолютно черного тела будут равны:

$$B_{\lambda_1 T} / B_{\lambda_2 T} = B_{0\lambda_1 T_{\text{ц}}} / B_{0\lambda_2 T_{\text{ц}}} \quad (7.11)$$

Цветовой температурой тела  $T_{\text{ц}}$  называется такая температура абсолютно черного тела, при которой отношение спектральных энергетических яркостей абсолютно черного тела при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  равно отношению спектральных яркостей при тех же длинах волн реального тела с температурой  $T$ . Согласно (7.2) (7.11) можно записать в виде

$$\frac{\epsilon_{\lambda_1 T} B_{0\lambda_1 T}}{\epsilon_{\lambda_2 T} B_{0\lambda_2 T}} = \frac{B_{0\lambda_1 T_{\text{ц}}}}{B_{0\lambda_2 T_{\text{ц}}}} \quad (7.12)$$

Подставив значения  $B_{0\lambda_1 T}$ ,  $B_{0\lambda_2 T}$ ,  $B_{0\lambda_1 T_{\text{ц}}}$  и  $B_{0\lambda_2 T_{\text{ц}}}$  в соответствии с формулой (7.5), получим

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ц}}} = [\ln \{ \epsilon_{\lambda_1 T} / \epsilon_{\lambda_2 T} \}] / \left[ C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \right] \quad (7.13)$$

Для определения действительной температуры тела  $T$  по его цветовой температуре  $T_{\text{ц}}$ , показываемой пирометром, необходимо знать длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , при которых определяется отношение спектральных энергетических яркостей и отношение коэффициентов черноты  $\epsilon_{\lambda_1 T} / \epsilon_{\lambda_2 T}$  при этих длинах волн. При оценке отношения  $\epsilon_{\lambda_1 T} / \epsilon_{\lambda_2 T}$  ошибка меньше, чем при определении отдельно  $\epsilon_{\lambda_1 T}$  и  $\epsilon_{\lambda_2 T}$ . Это объясняется тем, что излучение большинства реальных тел близко к излучению серых тел, т. е.  $\epsilon_{\lambda_1 T} \neq 1$  и  $\epsilon_{\lambda_2 T} \neq 1$ . Но  $\epsilon_{T(\lambda)} \approx \text{const}$ , а значит, и отношение  $\epsilon_{\lambda_1 T} / \epsilon_{\lambda_2 T}$  близко к 1. И соответственно отличие цветовой температуры  $T_{\text{ц}}$  от действительной  $T$  будет незначительным.

В пирометре полного излучения температура тела определяется по интегральной энергетической яркости излучения. Предположим, что действительная температура реального тела равна  $T$ . Интегральная энергетическая яркость будет  $B_T$ . В связи с тем что пирометр градуировался по излучению черного тела, при визировании на реальное тело он покажет температуру абсолютно черного тела  $T_p$ , при которой интегральные энергетические яркости реального тела и абсолютно черного тела будут равны:

$$B_T = B_{0T_p} \quad (7.14)$$

Радиационной температурой тела  $T_p$  называется такая температура абсолютно черного тела, при которой интегральные энергетические яркости абсолютно черного тела и реального тела при температуре  $T$  равны. Запишем (7.14) с учетом (7.2):

$$\epsilon_T B_{0T} = B_{0T_p} \quad (7.15)$$

где  $\epsilon_T$  — интегральный коэффициент теплового излучения. Подставив (7.7) в (7.15), получим

$$\epsilon_T \frac{\sigma}{\pi} T^4 = \frac{\sigma}{\pi} T_p^4$$

откуда

$$T = T_p \sqrt[4]{1/\epsilon_T} \quad (7.16)$$

Для определения действительной температуры  $T$  по радиационной температуре тела  $T_p$  необходимо знать только значение интегрального коэффициента:

Таблица 7.3. Коэффициент теплового излучения (интегральный коэффициент черноты) различных материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\epsilon_T$	
Алюминий:	полированный	200—600	0,04—0,06
	сильноокисленный	100—600	0,20—0,33
Сталь листовая:	шлифованная	930	0,55
	окисленная	40	0,66
	шероховатая	40	0,80
Латунь:	полированная	275	0,03
	тусклая пластина	40—260	0,22
	окисленная при нагреве	200—600	0,61—0,59
Асбест картон	40	0,96	
Кирпич:	диас	1000	0,85
	шамот	1000	0,59
	магнезит	1000	0,38
Фарфор	40	0,93	
Вода (слой 0,1 мм и более)	40	0,96	
Стекло пирекс	260—540	0,94—0,75	

теплового измерения  $\epsilon_T$ . Вообще говоря,

$$\epsilon_T = \int_0^{\infty} \epsilon_T(\lambda) d\lambda.$$

Однако практическое определение  $\epsilon_T$  связано с большими трудностями, чем определение  $\epsilon_{\lambda T}$ . И разброс значений  $\epsilon_T$  в зависимости от состояния поверхности для одного и того же материала очень велик (табл. 7.3). Поэтому и ошибки при определении действительной температуры тела по его радиационной температуре будут значительными.

На практике трудно осуществить такой приемник излучения, который поглощал бы излучение всех длин волн от 0 до  $\infty$ . Поэтому многие пирометры воспринимают излучение в более или менее широкой области спектра от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  и фактически измеряют энергетическую яркость в ограниченном интервале длин волн:

$$B_{0T\lambda_1\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{0\lambda T} d\lambda. \quad (7.17)$$

В этом случае для описания зависимости  $B_{0T\lambda_1\lambda_2} = f(T)$  нельзя применить ни формулу Стефана—Больцмана, ни формулу Планка. Эта группа пирометров называется пирометрами ча-

стичного излучения. В большинстве случаев они требуют индивидуальной градуировки, а псевдотемпература, показываемая ими, практически не может быть сравнима ни с яркостной, ни с радиационной температурой.

Рассмотрим преимущества и недостатки методов измерения температуры тел по излучению. Во-первых, все методы измерения не требуют непосредственного контакта с измеряемой средой, они могут измерять температуру на расстоянии бесконтактным способом и поэтому не искажают температурного поля объекта измерения. Во-вторых, верхний предел измерения пирометрами излучения не ограничен. В третьих, все методы очень чувствительны. Изменение спектральной энергетической яркости в видимой части спектра составляет  $(10^3-10^{10}) \Delta T/T$ , а интегральной энергетической яркости—примерно  $(\Delta T/T)^4$ . Для отношения спектральных энергетических яркостей в видимой части спектра изменение может составлять  $(10-10^3) \times \Delta T/T$ .

Однако все методы при измерении температуры реальных тел дают значение условной псевдотемпературы (яркостной, цветовой, радиационной), а не действительной температуры тела. В общем случае наименьшее отклонение от действительной имеет цветовая температура, а наибольшее—радиационная:

$$|T - T_{\text{ц}}| < T - T_{\text{я}} < T - T_{\text{р}}. \quad (7.18)$$

В табл. 7.4 представлены погрешности различных методов измерения температуры тел по их излучению. В таблице взяты крайние значения области наиболее часто встречающихся на практике значений  $\epsilon_{\lambda T}$  и  $\epsilon_T$ , а также отношения  $\epsilon_{\lambda_1 T}/\epsilon_{\lambda_2 T}$ . Как видно из таблицы, расхождение между температурой, показываемой пирометром, и действительной температурой тела может составлять десятки и сотни градусов.

Пирометры излучения могут применяться без ограничений при измерении температуры твердых тел и жидких сред, которые имеют непрерывный спектр излучения. Эти методы могут быть использованы и для измерения температуры газов, имеющих линейчатый или полосовой спектр излучения. Однако при измерении температуры газов по излучению необходимо так по-

Таблица 7.4. Погрешности различных методов измерения температуры реальных тел по их излучению

Действительная температура тела $T$ , К	Условная температура	Значение условной температуры, К		Погрешность измерения, К	
		$\epsilon_{\lambda} T = 0,2$ $\epsilon_{\lambda_1} T / \epsilon_{\lambda_2} T \approx 1,3$ $\epsilon_T = 0,2$	$\epsilon_{\lambda} T = 0,95$ $\epsilon_{\lambda_1} T / \epsilon_{\lambda_2} T \approx 1,01$ $\epsilon_T = 0,95$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$
1000	$T_{я}$	932	998	-68	-2
	$T_{ц}$	974	999	-26	-1
	$T_{р}$	669	987	-331	-13
1500	$T_{я}$	1352	1495	-148	-5
	$T_{ц}$	1442	1497	-58	-3
	$T_{р}$	1003	1481	-497	-19
2000	$T_{я}$	1746	1991	-254	-9
	$T_{ц}$	1898	1995	-102	-5
	$T_{р}$	1337	1974	-663	-26

добрать характеристики пирометра, чтобы полоса пропускания оптической системы практически совпала с одной из полос излучения данного газа.

Одной из основных составляющих погрешности измерения температуры пирометрами излучения является погрешность за счет неопределенности коэффициента теплового излучения измеряемого тела. Как видно из табл. 7.2, монохроматический коэффициент излучения  $\epsilon_{\lambda}$  для одного и того же тела в зависимости от состояния поверхности может различаться в 2—3 раза, причем погрешность измерения температуры, обусловленная неопределенностью  $\epsilon_{\lambda}$ , пропорциональна измеряемой температуре и относительной погрешности значения  $\epsilon_{\lambda}$ :

$$\frac{\Delta T}{T} = - \frac{\lambda}{C_2} T \frac{\Delta \epsilon_{\lambda}}{\epsilon_{\lambda}}. \quad (7.19)$$

В реальных условиях  $\epsilon_{\lambda}$  зависит от рода материала, состояния его поверхности и ее температуры. Поэтому ошибка в оценке составляет, как правило, не менее 10—20%. Относительная погрешность измерения температуры за счет неопределенности  $\epsilon_{\lambda}$  для квази-монохроматического метода может составлять 2—3% и более.

В пирометрах спектрального отношения погрешность измерения за счет неопределенности отношения  $\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2}$  будет значительно меньше, хотя структура выражения для относительной погрешности аналогична (7.19) и имеет вид

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T}{C_1 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \frac{\Delta \left( \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \right)}{\frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}}}. \quad (7.20)$$

Сравнивая (7.19) и (7.20), можно сделать вывод, что выражение (7.20) в большей степени зависит от  $\Delta (\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2})$ , чем выражение (7.19) от  $\Delta \epsilon_{\lambda}$ . Однако в связи с тем что  $\epsilon_{\lambda}$  медленно изменяется по спектру  $\epsilon_{\lambda_1} \approx \epsilon_{\lambda_2}$  и  $\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2} \approx 1$ , а  $\Delta (\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2})$  очень мало, отношение  $\Delta T/T$  также очень мало.

В пирометрах полного излучения погрешность измерения температуры за счет неопределенности оценки интегрального коэффициента теплового излучения  $\epsilon_T$  определяется выражением

$$\Delta T/T = - \Delta \epsilon_T / (4 \epsilon_T). \quad (7.21)$$

Ошибка в оценке  $\epsilon_T$  может достигать 20—30% и более. Поэтому относительная погрешность измерения температуры за счет неопределенности  $\epsilon_T$  для метода полного излучения может составить 5—8% и более.

Кроме погрешности, связанной с неопределенностью коэффициента теплового излучения, при измерении температуры пирометрами излучения могут иметь место погрешности за счет влияния промежуточной среды. Ослабление теплового излучения промежуточной средой, находящейся между объектом измерения и пирометром, влияет на результаты измерения всех пиромет-

ров. Однако степень этого влияния может быть различной. Например, запыленность и задымленность промежуточной среды в наибольшей степени влияет на показания пирометров полного или частичного излучения. Это объясняется тем, что частицы пыли, копоти рассеивают излучение ослабляя практически все длины волн. Существенное влияние на показания пирометров полного излучения оказывают водяные пары и углекислый газ, находящиеся в промежуточной среде, причем в области пропускания стеклянной и кварцевой оптики пирометров находится несколько полос поглощения  $H_2O$  и  $CO_2$ .

В квазимонохроматических пирометрах влияние промежуточной среды, как правило, меньше. Исключение составляют случаи, когда спектры поглощения веществ, находящихся в промежуточной среде, совпадают с длинами волн, при которых производятся измерения. Аналогичное положение и с методом спектрального отношения. Однако пыль с размерами частиц меньшими, чем эффективная длина волны (0,65 мкм), будет оказывать влияние на результаты измерения. Правда, таких частиц, как правило, немного.

нительную погрешность при  $T = 3000$  К [1]:

Стекло . . . . .	ПС-2	НС-13
$\Delta T, K$ . . . . .	-6,8	+11,6

Выбору и применению различных методов измерения температуры по излучению должны предшествовать изучение излучающих свойств объекта измерения и анализ условий измерения, промежуточной и окружающей среды, посторонних источников излучения и других факторов, которые могут влиять на излучение, воспринимаемое пирометром.

#### 7.4. Устройство пирометров излучения

В зависимости от метода измерения пирометры разделяются на квазимонохроматические, спектрального отношения (или спектрального распределения), полного (или частичного) излучения. В названии пирометра может указываться тип приемника излучения, например фотоэлектрический (фотоэлемент, фоторезистор, фотодиод и т. п.) или термоэлектрический (термопары). Иногда в названии пирометра указывается способ сравнения излучения объекта измерения с излучением эталонного источника, например пирометр с исчезающей нитью или пирометр с оптическим клином.

Квазимонохроматический пирометр с исчезающей нитью. На рис. 7.3 представлена прив-

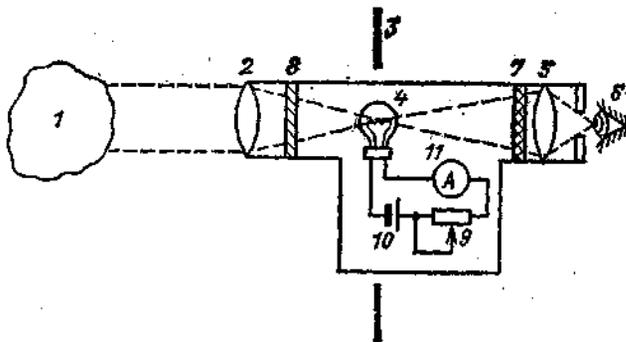


Рис. 7.3. Принципиальная схема квазимонохроматического пирометра

На показания всех пирометров излучения будут оказывать влияние посторонние источники излучения. Расчет этой погрешности затруднителен. Поэтому желательно так организовать измерения, чтобы исключить эту погрешность.

Практически все пирометры излучения имеют стеклянную или кварцевую оптическую систему. Изменение температуры этой оптики может привести к изменению коэффициента пропускания оптической системы. Например, изменение температуры поглощающего стекла с 25 до 35 °С вызывает допол-

нительная схема оптического пирометра. Излучение от объекта измерения 1 проходит через объектив 2 и фокусируется в плоскости 3. В этой же плоскости расположена нить пирометрической лампы 4. Изображение объекта измерения и нити пирометрической лампы может быть рассмотрено наблюдателем 6 (пирометристом) через окуляр 5. Между нитью пирометрической лампы и окуляром располагается красный светофильтр 7. Между объективом и нитью пирометрической лампы может вводиться поглощающее стекло 8. Для изменения накала нити применяется реостат 9, который изменяет ток, проходящий через нить пирометрической лампы от источника питания 10. Значение тока измеряется прибором 11, отградуированным в значениях яркостной температуры.

Перед началом измерений проводится настройка оптической системы (объектив—окуляр) таким образом, чтобы изображение объекта измерения и нить пирометрической лампы находились в одной плоскости. Это достигается перемещением объектива. Кроме того, необходимо, чтобы нить пирометрической лампы на изображении объекта измерения была видна наблюдателю четко, резко. Это достигается перемещением окуляра.

Квазимонохроматический пирометр предусматривает измерение температуры по спектральной энергетической яркости тела, т. е. по излучению при определенной длине волны. Для монохроматизации (выделения определенной длины волны) излучения в пирометре устанавливается красный светофильтр. На рис. 7.4, а представлены спектральные характеристики человеческого глаза  $P(\lambda)$  и красного светофильтра и показано, что через красный светофильтр человеческий глаз воспринимает излучение в узком участке спектра с эффективной длиной волны  $\lambda_{эф} = 0,65$  мкм (рис. 7.4, б). Принципиально в пирометре может быть применен любой светофильтр (синий, зеленый), выделяющий узкую полосу длин волн. Красный светофильтр удобен тем, что имеет резкую

накале нити спектральная энергетическая яркость ее излучения соответствует излучению абсолютно черного тела при определенной температуре. Ток накала в пирометре не может быть больше определенного значения, соответствующего яркостной температуре около 1500 °С. Для возможности измерения более высоких температур в пирометре между объективом и пирометрической лампой устанавливается поглощающее стекло  $\delta$ . Это стекло ослабляет излучение от объекта измерения. Степень ослабления энергетической яркости объекта измерения определяется коэффициентом пропускания  $\tau_\lambda$  поглощающего стекла. По аналогии с (7.8) и (7.9) можно написать

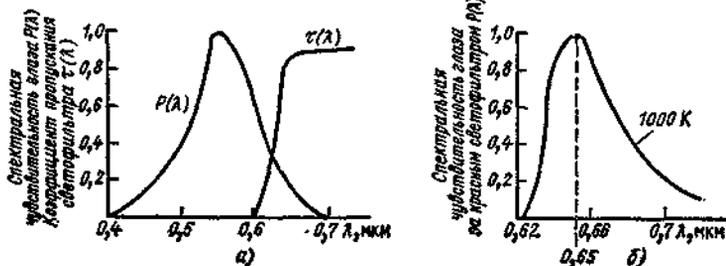
$$1/T' - 1/T = \lambda/C_2 \ln \tau_\lambda = A, \quad (7.22)$$

где  $T'$  — температура по шкале пирометра с поглощающим стеклом, К;  $T$  — температура по шкале пирометра без поглощающего стекла, К;  $A$  — пирометрический коэффициент ослабления, К<sup>-1</sup>.

Квазимонохроматические пирометры выпускаются с различными верхними пределами измерения до 5000 °С с использованием погло-

Рис. 7.4. Спектральные характеристики:

а — человеческого глаза  $P(\lambda)$  и красного светофильтра  $\tau(\lambda)$ ; б — излучения, воспринимаемого глазом через красный светофильтр



границу пропускания вблизи края видимого глазом спектра. Кроме того, если сравнить спектральные энергетические яркости в красном и синем свете, то при температурах 800—1000 К они различаются на шесть—семь порядков. Поэтому с красным фильтром можно измерять более низкие температуры, а значит, можно понизить нижний предел измерения пирометра.

Процесс измерения сводится к изменению накала нити пирометрической лампы, а значит, и ее яркости до тех пор, пока глаз наблюдателя не перестанет различать нить пирометрической лампы на фоне объекта измерения: нить «исчезает» на фоне объекта измерения. В этот момент производят отсчет значения температуры, так как спектральная энергетическая яркость реального тела (объекта измерения) и спектральная энергетическая яркость нити пирометрической лампы равны. Пирометр градуируется по излучению абсолютно черного тела, поэтому можно считать, что при «исчезновении» нити пирометрической лампы на фоне объекта измерения наступило равенство спектральной энергетической яркости реального тела и спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела. Хотя сама нить пирометрической лампы не является абсолютно черным телом, но в процессе градуировки излучение нити при определенных значениях тока накала сопоставлено с излучением абсолютно черного тела при его соответствующих температурах. Поэтому известно, что при дан-

ных стеклах с различными коэффициентами пропускания.

Рассмотренный вариант квазимонохроматического пирометра предусматривает сравнение спектральных энергетических яркостей реального и черного тел (или нити пирометра, отградуированной по излучению черного тела) человеческим глазом.

В настоящее время существует большая группа автоматических пирометров, которые называются фотоэлектрическими. В связи с тем что псевдотемпература, показываемая пирометром, определяется в первую очередь методом, а не средством измерения, в ГОСТ 13417-76 нет средств измерения под названием «фотоэлектрический пирометр», поэтому в названии любого пирометра должен обязательно указываться метод измерения, например квазимонохроматический фотоэлектрический пирометр, или фотоэлектрический пирометр частичного излучения, или фотоэлектрический пирометр спектрального отношения, где указано, по какому методу осуществляется измерение. В фотоэлектрических пирометрах в качестве светочувствительного элемента применяются фотоэлементы, фотодиоды, фототранзисторы и фотоумножители. В зависимости от функции, выполняемой светочувствительным элементом, все фотоэлектрические пирометры можно разделить на две группы: в одной фотозлемент сравнивает световые потоки от двух источников излучения и работает в режиме нуль-прибора, а другой фотозлемент выраба-

тывает сигнал, однозначно зависящий от светового потока, а значит, от температуры измеряемого тела. В первом случае устройство прибора оказывается более сложным, но зато его показания не зависят от характеристик фотоэлемента и электронной схемы и их изменения во времени. Во втором случае устройство прибора проще, но его показания могут существенно меняться в процессе эксплуатации.

Рассмотрим принципиальную схему квази-монохроматического фотоэлектрического пирометра типа ФЭП-4 (рис. 7.5). Отличительной особенностью этого пирометра является то, что спектральные характеристики фотоэлемента и красного светофильтра позволяют получить эффективную длину волны (при которой пирометр воспринимает излучение), близкую или практически равную эффективной длине волны квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью (рис. 7.3). Поэтому яркостная температура, отсчитанная по ФЭП, и яркостная температура, определенная по пирометру с исчезающей нитью, будут близки или для пирометра с нижним пределом измерения  $800^{\circ}\text{C}$  практически равны.

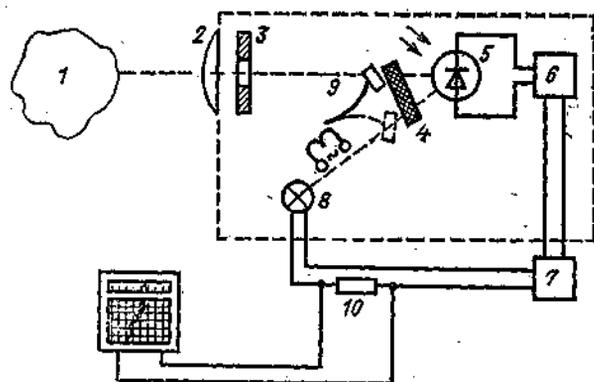


Рис. 7.5. Принципиальная схема квазимонохроматического фотоэлектрического пирометра

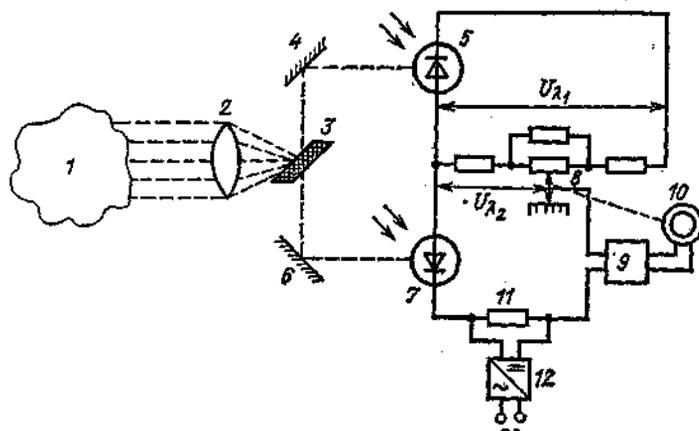


Рис. 7.6. Принципиальная схема пирометра спектрального отношения

Излучение измеряемого тела 1 через объектив 2 и диафрагму 3 направляется через красный светофильтр 4 на фотоэлемент 5. На этот же фотоэлемент поступает излучение от излучателя сравнения 8. Фототок, возникающий в фотоэлементе, усиливается в усилителе 6 и поступает на силовой блок 7, который изменяет ток питания излучателя сравнения (лампы обратной связи) 8.

Световые потоки от измеряемого тела и излучателя сравнения поступают на фотоэлемент не одновременно, а поочередно. Для этого в схеме предусмотрен электромагнитный вибратор 9 с заслонкой, которая открывает световой поток то от измеряемого тела, то от излучателя сравнения. Если световые потоки от измеряемого тела и излучателя сравнения не равны, то и импульсы фототоков в соответствующие моменты времени будут также не равны. В этом случае усилитель 6 и блок 7 будут изменять ток питания излучателя 8 до тех пор, пока фототоки в фотоэлементе в оба полупериода не будут равны. При равенстве фототоков в оба полупериода изменения тока питания излучателя не происходит. Таким образом, ток питания излучателя сравнения однозначно определяется световым потоком от измеряемого тела, который в свою очередь зависит от температуры измеряемого тела. Ток питания излучателя сравнения измеряется автоматическим потенциометром по падению напряжения на образцовом резисторе 10.

Пирометры ФЭП градуируются по излучению абсолютно черного тела, поэтому температура, отсчитанная на автоматическом потен-

циометре, при измерении реальных тел будет яркостной температурой этого реального тела. Переход к действительной температуре может быть осуществлен по выражению (7.13); следует иметь в виду, что в пирометрах с диапазоном измерения  $800\text{--}4000^{\circ}\text{C}$  эффективная длина волны  $0,65\text{ мкм}$  и их показания сопоставимы с показаниями визуальных квазимонохроматических пирометров. В пирометрах

ФЭП с нижним пределом измерения ниже  $800^{\circ}\text{C}$  эффективная длина волны лежит в интервале  $0,9-1,1$  мкм, поэтому их показания несколько отличаются от показаний визуальных пирометров.

Пирометры типа ФЭП широко применяются для непрерывного измерения температуры в прокатном производстве. Время установления показаний прибора составляет около 1 с, основная погрешность 1% при верхнем пределе измерения до  $2000^{\circ}\text{C}$  или 1,5% при верхнем пределе более  $2000^{\circ}\text{C}$ . Подавляющее большинство зарубежных фотоэлектрических пирометров работают как пирометры частичного излучения с рабочим диапазоном длин волн шириной от 0,2 до 2 мкм.

Пирометры спектрального отношения для промышленных измерений температуры, как правило, выпускаются автоматическими. Поэтому их правильнее называть фотоэлектрическими пирометрами спектрального отношения. В зависимости от спектральных характеристик фотоэлементов они воспринимают излучение в

виду спектральных энергетических яркостей  $V_{0\lambda_2 T_{\text{ц}}} / V_{0\lambda_1 T_{\text{ц}}}$ , которое определяется цветовой температурой  $T_{\text{ц}}$  измеряемого тела. Если  $U_{\text{в}}$  не уравновешено на реохорде 8, то на вход усилителя 9 будет поступать сигнал, который будет вращать реверсивный двигатель 10, перемещающий движок реохорда 8 до наступления уравновешивания. В цепь фотоэлемента 7 дополнительно подается опорное напряжение к резистору 11 от стабилизатора напряжения 12.

Цветовые пирометры выпускаются на предел измерения от 200 до  $2800^{\circ}\text{C}$  с поддиапазонами по  $200-800^{\circ}\text{C}$ . Предел основной погрешности цветковых пирометров не превышает 1% верхнего предела измерения каждого поддиапазона.

В настоящее время начинает получать распространение так называемый пирометр истинной температуры ПИТ-1, который представляет собой пирометр спектрального отношения, осуществляющий автоматическое ве-

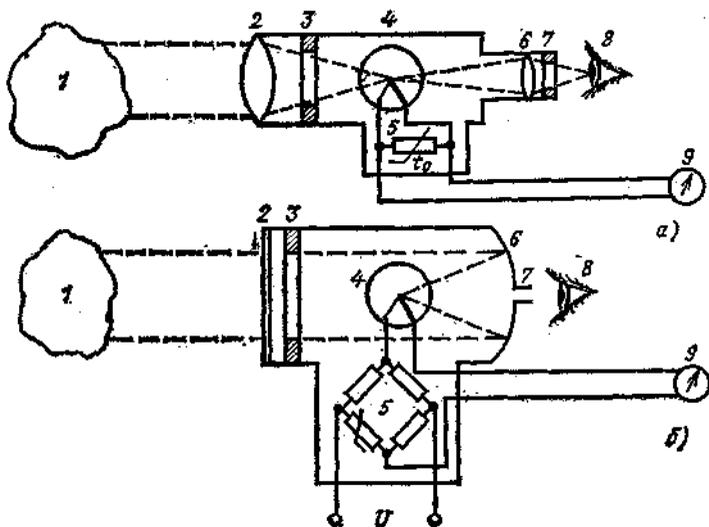


Рис. 7.7. Принципиальные схемы пирометров полного излучения:

а — рефракторного; б — рефлекторного

видимой или в инфракрасной области спектра. Существует большое число различных по принципу построения схем пирометров спектрального отношения, каждая из которых имеет свои положительные и отрицательные свойства. Рассмотрим одну из схем фотоэлектрического пирометра спектрального отношения (рис. 7.6). Излучение от измеряемого тела 1 поступает в объектив 2 пирометра и затем на фильтр из фосфида индия 3, на котором световой поток частично отражается и через зеркало 4 направляется на кремниевый фотоэлемент 5, на котором под влиянием света возникает фото-ЭДС  $U_{\lambda_1}$ . Другая часть светового потока частично пропускается фильтром 3 и через зеркало 6 направляется на фотоэлемент 7, на котором возникает фото-ЭДС  $U_{\lambda_2}$ . Эффективная длина волны отраженного фильтром 3 излучения  $\lambda_1 = 0,888$  мкм, а длина волны излучения, прошедшего через фильтр 3,  $\lambda_2 = 1,034$  мкм. Выходное напряжение  $U_{\lambda}$  фотоэлемента 7 уравновешивается частью выходного напряжения фотоэлемента 5 на реохорде 8 компенсатора напряжений. Положение движка реохорда 8 пропорционально отношению  $U_{\lambda_2} / U_{\lambda_1}$ , т. е. пропорционально отноше-

ние поправок, вычисляемых на основе информации, хранящейся в памяти прибора [1]. Пирометр рассчитан на диапазон измерения  $800-2000^{\circ}\text{C}$ . Погрешность измерения действительной температуры вследствие изменения коэффициента теплового излучения измеряемого тела от 0,3 до 1 не превышает  $\pm 1\%$ .

Пирометры полного излучения являются наиболее простыми по устройству. Комплект пирометра состоит из первичного преобразователя (телескопа) и вторичного прибора. В качестве чувствительного элемента, воспринимающего излучение, применяются чаще всего термопары из нескольких термоэлектрических термометров или специальных термозависимых резисторов — болометров. Для концентрации излучения на спаях термопары или на чувствительном элементе болометра применяют рефракторные (с собирающей линзой) или рефлекторные (с вогнутым зеркалом) оптические системы. Для того чтобы получить однозначную зависимость термо-ЭДС термопары (или сопротивления болометра) от потока излучения, необходимо поддерживать свободные концы термопары (или корпус болометра) при постоянной температуре.

Принципиальная схема рефракторного пирометра с термобатареей приведена на рис. 7.7, а, а рефлекторного пирометра — на рис. 7.7, б. Излучение от измеряемого тела 1 поступает на объектив (линзу) телескопа 2 (рис. 7.7, а) и через диафрагму 3 фокусируется на горячих спаях термобатарей 4, заключенной в специальную колбу. Параллельно термобатарее включен медный резистор 5, предназначенный для автоматической компенсации изменения температуры корпуса пирометра, при которой находятся свободные концы термобатарей. Термо-ЭДС поступает на измерительный прибор 9. Для визирования телескопа на объект измерения служат окуляр 6 и диафрагма 7, через которые наблюдатель 8 осуществляет визирование.

В рефлекторном телескопе (рис. 7.7, б) излучение через инфракрасный фильтр 2 и диафрагму 3 попадает на рефлектор (вогнутое зеркало) 6, отражается, а затем фокусируется на горячих спаях термобатарей 4. Мостик 5 с

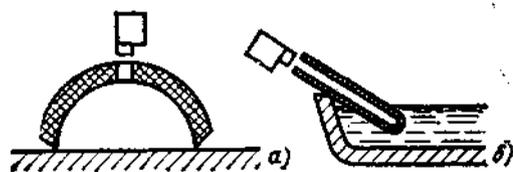


Рис. 7.8. Устройство для приближения излучения реальных тел к излучению черного тела:

а — полость черного тела; б — черная трубка

медным сопротивлением служит для автоматического введения поправки на температуру свободных концов, находящихся в корпусе. Визирование телескопа осуществляется наблюдателем 8 через отверстие для визирования 7.

Серийно выпускаемые пирометры полного излучения типа АПИР-С предназначены для измерения температуры в диапазоне от 30 до 2500 °С. Специально изготовленные пирометры применяются в интервале от -100 до 3500 °С. В систему АПИР-С входят также пирометры частичного излучения со спектральным диапазоном воспринимаемого излучения 0,7—1,1 и 0,8—1,8 мкм и поэтому псевдотемпературы, измеряемые этими пирометрами, не сопоставимы ни с  $T_p$ , ни с  $T_a$ .

Для уменьшения методической погрешности пирометров полного излучения, вызываемой неопределенностью интегрального коэффициента теплового излучения, часто в промышленных условиях создаются условия, приближающиеся к излучению черного тела. Например, для измерения температуры поверхностей используются огнеупорные или металлические блоки (рис. 7.8, а), для измерения температуры газов и жидких сред — огнеупорные трубки (рис. 7.8, б), на донышко которых визируется телескоп пирометра. При определенной шероховатости поверхности блока или трубки и при малом отношении  $d/l$  коэффициент теплового излучения такой искусственной полости черного тела приближается к 1 и нет необходимости вводить поправку в показания пирометра на нечерноту излучения, так как псевдотемпература, показываемая пирометром, будет практически равна действительной температуре тела.

## Глава восьмая

### ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

#### 8.1. Причины возникновения погрешностей

Измерение температуры различных тел и сред подразумевает наличие стационарного или нестационарного теплообмена между термометром и измеряемой средой, так как условием правильного измерения температуры является равенство температур термометра и измеряемой среды или измеряемого тела. Для того чтобы эти температуры стали равны, должен иметь место теплообмен, в результате которого часть теплоты от более нагретого тела (среды) должна быть передана менее нагретому телу (среде). Например, при измерении температуры человеческого тела медицинским термометром первоначально термометр, как правило, имеет более низкую температуру, чем тело человека. В процессе теплообмена или соприкосновении термометра с телом температура

термометра (термометра) через некоторое время становится равной температуре тела и тогда можно производить отсчет температуры по термометру.

Передача теплоты между телами или средами может происходить тремя способами — теплопроводностью, конвекцией и излучением. Анализируя условия измерения и условия теплообмена, можно оценить, отличается ли собственная температура термометра от температуры измеряемой среды, т. е. оценить погрешность измерения. В общем случае, если имеет место теплообмен не только между термометром и окружающей средой или другими частями технологического оборудования, собственная температура термометра не будет равна температуре измеряемой среды. Эта погрешность зависит от конструкции термометра или пирометра и особенностей его установки на объекте изме-

рения, от условий теплообмена термометра с измеряемой и окружающей средой, от режима работы оборудования или постоянства измеряемых параметров. Для пирометров излучения необходимо учитывать также влияние промежуточной (между измеряемым телом и пирометром) среды. Влияние тех или иных факторов определяется конкретным методом измерения. В установленном режиме, когда имеет место тепловое равновесие, термометр (или пирометр) будет иметь статическую погрешность измерения. В нестационарном режиме, когда либо сам измеряемый параметр, либо другие параметры измеряемой среды меняются, может иметь место динамическая погрешность измерения, определяемая конструкцией, теплофизическими свойствами термометра и условиями теплообмена с измеряемой средой.

### 8.2: Погрешности, обусловленные теплообменом за счет теплопроводности и излучения

При измерении температур жидкости, газа или пара термометр устанавливается в трубопроводе, газоходе или других местах технологического

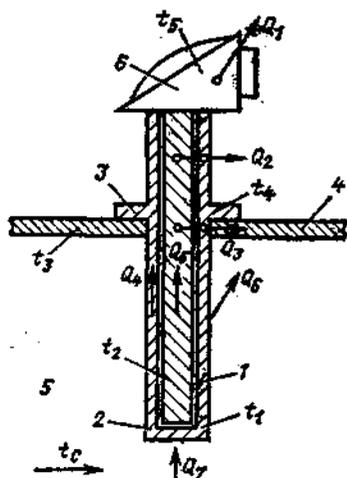


Рис. 8.1. Схема теплообмена термометра, установленного в трубопроводе

оборудования. При этом в общем случае имеет место сложный теплообмен между термодатчиком, измеряемой средой, окружающей средой и частями технологического оборудования. На рис. 8.1 схематично представлен термометр, установленный в трубопроводе. Термометр 1 расположен в

защитном чехле 2, и фланец 3 крепится к трубопроводу 4, по которому протекает измеряемая среда 5. На конце чехла расположена головка 6. Предположим, что температура измеряемой среды больше температуры окружающей среды, что наблюдается в большинстве случаев измерения температуры. Все приведенные ниже рассуждения и выводы справедливы и для случая, когда температура измеряемой среды ниже температуры окружающей среды, с учетом направления тепловых потоков. Температура головки термометра больше, чем температура окружающей среды. Поэтому от головки и выступающей части чехла идет передача теплоты к окружающей среде (соответственно потоки  $Q_1$  и  $Q_2$ ). Температура стенки трубопровода будет меньше температуры измеряемой среды. Поэтому от чехла и термометра к стенке трубопровода будет идти поток  $Q_3$ . В связи с тем что имеет место отвод теплоты от головки и чехла в окружающую среду и к стенке трубопровода, происходит подвод теплоты от частей чехла и термометра, находящихся в измеряемой среде  $Q_4$  и  $Q_5$ . Так как температура чехла  $t_1$  не равна температуре стенки трубопровода  $t_3$ , то от чехла к стенке будет передаваться за счет излучения поток  $Q_6$ . И, наконец, для восполнения всей отводимой от чехла и термометра теплоты от измеряемой среды к чехлу должна подводиться теплота  $Q_7$ . Но она может подводиться только в том случае, если температура измеряемой среды  $t_c$  и температура чехла  $t_1$  не равны. А эта разность температур  $t_1 - t_c$  и является погрешностью измерения. Можно сказать, что если температуры окружающей и измеряемой сред не равны, то всегда имеет место передача теплоты через чехол и сам термометр, а это вызывает несоответствие температур термометра и измеряемой среды. В этой системе имеют место следующие равенства тепловых потоков:  $Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5$ ;  $Q_7 = Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_6$ . Составляющие  $Q_1$  и  $Q_2$  определяются конвекцией,  $Q_3$ ,  $Q_4$  и  $Q_5$  — теплопроводностью,  $Q_6$  — излучением и  $Q_7$  — конвекцией или конвекцией и излучением, причем чем меньше  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и  $Q_6$ , тем меньше  $Q_7$ , тем меньше разница  $t_1 - t_c$ , а значит, меньше погрешность измерения.

Для реальных термометров практически невозможно определить все составляющие с учетом конструктивных особенностей термометра. Если считать, что передача теплоты по термометру осуществляется только за счет теплопроводности, т. е.  $Q_4 + Q_5 = Q_7$  (рис. 8.1), то можно оценить погрешность измерения для термометра, который представляет собой однородный стержень, заделанный одним концом в стенку трубопровода. Для такого полуограниченного стержня уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{d^2 [t_c - t_T(x)]}{dx^2} = \frac{P\alpha_K}{\lambda S} [t_c - t_T(x)], \quad (8.1)$$

где  $t_c$  — температура измеряемой среды, °С;  $t_T(x)$  — температура термометра (стержня) на расстоянии  $x$  от конца термометра, °С;  $x$  — расстояние от конца термометра до сечения, в котором температура будет  $t_T(x)$ , м;  $P$  — периметр термометра, м;  $S$  — сечение термометра (стержня), м<sup>2</sup>;  $\alpha_K$  — коэффициент конвективной теплоотдачи между термометром и измеряемой средой, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности чехла термометра, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Решение этого уравнения (8.1) дает выражение

$$t_T - t_c = -(t_c - t_{CT}) / \text{ch } l \sqrt{\frac{P\alpha_K}{\lambda S}}, \quad (8.2)$$

где  $t_{CT}$  — температура стенки трубопровода в месте заделки термометра ( $x=l$ ), °С;  $l$  — длина термометра (расстояние от конца термометра до места его заделки, м).

Зная температуру термометра и температуру стенки, можно определить температуру измеряемой среды  $t_c$  или по температуре среды и температуре стенки оценить температуру термометра [4]. Следует еще раз отметить, что эти расчеты носят приближенный, оценочный характер, так как реальные термометры имеют конструкцию более сложную, чем полуограниченный стержень. Кроме того, в выражении (8.1) учитывается только передача теплоты теплопроводностью. Можно приближенно считать, что передача теплоты по термометру только за счет теплопроводности имеет место при измерении температуры жидкостей, полностью заполняющих пространство, в котором расположен термометр.

При измерении высоких температур газового потока можно считать, что определяющее влияние имеет  $Q_6$  (рис. 8.1) — передача теплоты излучением. Если предположить, что термометр отдает (воспринимает) теплоту только за счет излучения, то  $Q_6 = Q_7$ , и уравнение теплообмена имеет вид

$$C_0 \varepsilon_{np} F_T \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right] = \alpha_K F_T (t_c - t_T), \quad (8.3)$$

где  $C_0 = \sigma \cdot 10^8$ ;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_{np}$  — приведенный коэффициент теплового излучения термометр — стенка при  $F_T \ll F_{CT}$ ;  $F_T$  и  $F_{CT}$  — поверхности термометра и стенки, м<sup>2</sup>;  $T_T$  — температура термометра, К;  $T_{CT}$  — температура стенки, К. Решение (8.3) дает выражение для погрешности

$$t_T - t_c = - \frac{C_0 \varepsilon_{np}}{\alpha_K} \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right]. \quad (8.4)$$

По температуре термометра ( $t_T$  и  $T_T$ ) и температуре стенки ( $T_{CT}$ ), зная  $\alpha_K$  и  $\varepsilon_{np}$ , можно определить температуру измеряемой среды  $t_c$  [4]. Еще раз отметим, что хотя расчет делается для идеализированных условий, однако он дает возможность оценить порядок погрешности за счет излучения. Часто имеет место одновременно теплопередача за счет теплопроводности, излучения и конвекции. В этом случае тепловой баланс термометра можно представить в виде

$$Q_T + Q_K = Q_N, \quad (8.5)$$

где  $Q_T$ ,  $Q_K$ ,  $Q_N$  — составляющие теплообмена за счет теплопроводности, излучения и конвекции, или с учетом обозначений рис. 8.1 получить  $Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q_7$ . Принимая упрощенную модель термометра — однородный металлический стержень, одним концом заделанный в трубопровод, — определим составляющие уравнения (8.5) по формуле

$$\begin{aligned} S\lambda \sqrt{\frac{\alpha_K P}{\lambda S}} (t_c - t_{CT}) \text{th } l \sqrt{\frac{\alpha_K P}{\lambda S}} + \\ + C_0 \varepsilon_{np} F_T \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right] = \\ = \alpha_K F_T (t_c - t_T), \quad (8.6) \end{aligned}$$

откуда погрешность измерения

$$t_i - t_c = -\frac{l}{l} \sqrt{\frac{\lambda S}{P \alpha_k}} (t_c - t_{ст}) \operatorname{th} l \times \\ \times \sqrt{\frac{\alpha_k P}{\lambda S} + \frac{C_0 \varepsilon_{пр}}{\alpha k} \left[ \left( \frac{T_T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]}. \quad (8.7)$$

Как отмечалось выше, чем меньше теплоты будет передаваться через термометр, тем меньше будет погрешность, обусловленная теплообменом. Рассмотрим пути уменьшения этой погрешности, анализируя выражение (8.7).

Увеличение длины термометра  $l$  увеличивает термическое сопротивление и уменьшает погрешность. В связи с тем что размеры трубопровода ограничены, часто увеличивают длину термометра, устанавливая его в коле-

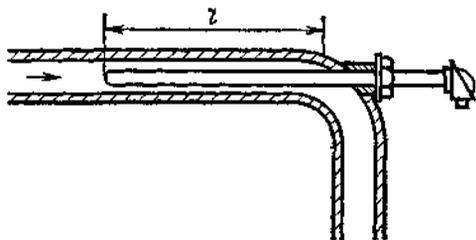


Рис. 8.2. Установка термометра в колено трубопровода

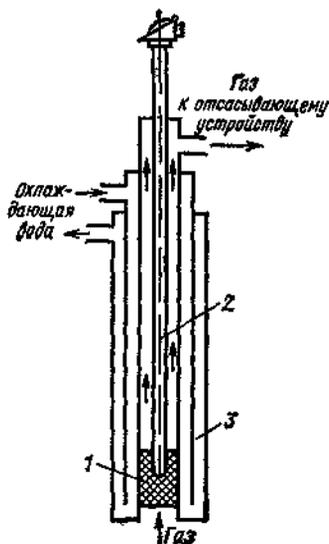


Рис. 8.3. Схема отсасывающего термометра

но трубопровода (рис. 8.2) и уменьшая при этом погрешность измерения.

Увеличение конвективного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  уменьшает погрешность измерения. Однако увеличение  $\alpha_k$  за счет увеличения скорости потока не всегда может быть осуществлено на конкретном технологическом оборудовании. Иногда применяются специально изготовленные отсасывающие термометры (рис. 8.3). Измеряемый газ с большой скоростью просасывается через специальный керамический фильтр 1, омывая термометр 2. Все это расположено в водоохлаждаемом устройстве 3. Таким образом, с одной стороны, увеличивается  $\alpha_k$  и, с другой стороны, уменьшается составляющая  $Q_{л}$ .

Возможность уменьшения сечения  $S$  или увеличения периметра  $P$  определяется механической и термической прочностью материала чехла, термометра. Аналогичные замечания относятся и к увеличению теплопроводности  $\lambda$  материала чехла термометра.

Теплообмен излучением может быть уменьшен за счет уменьшения  $\varepsilon_{пр}$ . Для этого можно сделать поверхность термометра полированной, зеркальной. Однако в реальных условиях эта поверхность быстро окисляется и  $\varepsilon_{пр}$  увеличивается. Поэтому этот путь может быть использован только в отдельных случаях.

Приближение температуры стенки ( $t_{ст}$ ,  $T_{ст}$ ) к температуре термометра  $t_T$  или среды  $t_c$  уменьшает передачу теплопроводностью и излучением. Во многих случаях тепловая изоляция трубопровода делает температуру стенки близкой к температуре измеряемой среды ( $t_{ст} \approx t_c$ ) и тогда практически погрешность будет отсутствовать. Например, тепловая изоляция паропроводов на электростанциях такова, что температура стенки отличается от температуры измеряемой среды не более чем на 2—3 °С. При этом погрешность составляет 0,01—0,02 °С.

Однако не всегда можно осуществить такую изоляцию. Поэтому одним из путей приближения температуры стенки к температуре среды является применение экранов (рис. 8.4). Для уменьшения лучистого теплообмена вокруг термометра располагается двух- или трехслойный экран (рис. 8.4, а), который существенно уменьшает теплообмен излучением. Применение экраняющей пластины 1 (рис. 8.4, б) уменьшает передачу теплоты теплопро-

водностью. В некоторых случаях применяют подогрев термометров для приближения  $t_{ст}$  к  $t_c$ . Примеры расчетов погрешностей измерения, обусловленных теплопроводностью и излучением, приведены в [4]. Следует отметить, что все рассмотренные выше пути уменьшения погрешности — это пути уменьшения теплопереноса между термометром и другими частями оборудования и измеряемой средой, т. е. фактически это — теплофизическая задача, которая решается на основе законов теплопередачи.

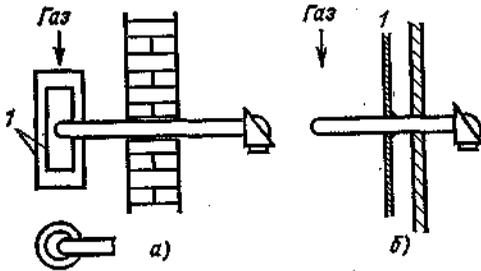


Рис. 8.4. Схема экранированных термометров: а — при теплоотводе излучением; б — при теплоотводе теплопроводностью по челду

### 8.3. Погрешности измерения температур в нестационарных режимах

Если в установившемся режиме погрешность измерения температуры зависела в основном от теплового потока, проходящего через термометр, то в неустановившемся, нестационарном режиме погрешность измерения носит специфический, динамический характер и зависит также от ряда других факторов.

Причиной возникновения динамической погрешности измерения является несоответствие, которое возникает при изменении температуры измеряемой среды между количеством теплоты, которую необходимо передать термометру (или от термометра), чтобы нагреть (или охладить) его до нового значения температуры измеряемой среды, и количеством теплоты, которая при данных условиях теплообмена может быть мгновенно передана от измеряемой среды термометру (или наоборот).

Рассмотрим типичный характер изменения температуры термометра при ступенчатом изменении температуры среды. В этом случае (рис. 8.5) в момент времени  $t_0$  температура измеряемой среды изменяется от  $t_{c,нач}$  до  $t_{c,кон}$ , а температура термометра  $t_T$  в общем случае будет изменяться по закону, характеризующему кривой 1. При этом температура термометра только через бесконечно большой промежуток времени станет равной температуре измеряемой среды. В течение всего этого времени будет иметь место динамическая погрешность  $\Delta t_D$ , которая определяется разностью температур термометра  $t_T$  и измеряемой среды  $t_c$ . В общем виде динамическая погрешность определяется рядом [6]

$$\Delta t_D = t_T - t_{c,кон} = (t_{c,нач} - t_{c,кон}) \sum_{i=1}^n A_i B_i \exp(-\tau/\varepsilon_i), \quad (8.8)$$

где  $A_i, B_i, \varepsilon_i$  — коэффициенты, определяемые граничными условиями, конструкцией термометра, теплофизическими свойствами материалов термометра и условиями теплообмена между термометром и измеряемой средой.

В простейшем случае, когда число Био  $Bi = \alpha R / \lambda < 0,16$ , можно считать, что динамическая погрешность  $\Delta t_D$  для длинного однородного цилиндра описывается одной экспонентой (рис. 8.5, кривая 2):

$$\Delta t_D = t_T - t_{c,кон} = (t_{c,нач} - t_{c,кон}) \exp(-\tau/\varepsilon). \quad (8.9)$$

В этом случае через время  $\tau = \varepsilon$  динамическая погрешность измерения

$$\Delta t_D |_{\tau=\varepsilon} = 0,368 (t_{c,нач} - t_{c,кон}). \quad (8.10)$$

Динамические свойства термометриков, как отмечалось выше, зависят не только от конст-

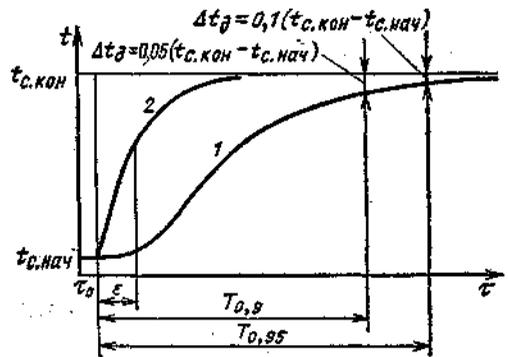


Рис. 8.5. Изменение температуры термометра при мгновенном изменении температуры среды

рукции и теплофизических свойств материалов термометра, но и от условий теплообмена. Поэтому все расчетно или экспериментально определенные численные значения динамических характеристик термометров будут справедливы только для данного термометра и конкретных условий теплообмена. Даже такие универсальные характеристики динамических свойств термометров, как частотные, оказываются нераспространяемыми на другие условия теплообмена или на другие термометры этого же типа. Иногда для характеристики динамических свойств применяется показатель тепловой инерции  $\varepsilon$ , который часто называют постоянной времени термометра. Но, как показано выше [(8.9) и (8.10)],  $\varepsilon$  справедлив только при  $Bi < 0,16$ , когда переходный процесс может быть описан одной экспонентой (кривая 2 рис. 8.5), в остальных случаях (кривая 1 рис. 8.5) им пользоваться нельзя.

Для характеристики динамических свойств термометров используются также такие показатели, как время установления показаний или время 10 или 5 % недохода до установившегося значения, когда динамическая погреш-

ность составляет соответственно 10 или 5 % первоначального изменения температуры  $t_{0,ком} - t_{0,вещ}$ . Эти характеристики обозначаются  $t_{0,вещ}$  или  $T_{0,в}$  и  $T_{0,ком}$  (рис. 8.5). Они определяются, как правило, при переносе термометра из кипящей воды в воздух или наоборот. Характеристики  $T_{0,в}$  и  $T_{0,ком}$  могут использоваться

для сравнения динамических свойств термометров. Для термометров простейшей формы (цилиндр, шар) в некоторых случаях могут быть получены уравнения, устанавливающие связь между температурой термометра и температурой измеряемой среды для любого момента времени [6, 7].

## Глава девятая

### ТЕРМОМЕТРЫ И ПИРОМЕТРЫ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Практические измерения температуры отличаются чрезвычайным разнообразием условий измерения и требований, предъявляемых к средствам измерения. Все это заставляет тщательно анализировать и совершенствовать методы и средства измерения применительно к конкретным условиям и требованиям. В большинстве случаев стараются использовать термометры и пирометры, которые серийно выпускаются приборостроительными заводами (см. рис. 4.1, 4.3, 5.7—5.9, 6.1, 6.3). Однако в ряде случаев из-за особенностей условий измерения температуры применяются термометры специального назначения. Некоторые из наиболее характерных особых условий измерения, применяемые методы и средства измерения рассмотрены ниже.

#### 9.1. Измерение температуры поверхностей

Измерение температуры поверхностей осуществляется как контактными, так и бесконтактными методами. При измерении температуры поверхностей контактными термометрами обычно существуют две проблемы: 1) обеспечение равенства температур термометра и измеряемой поверхности; 2) исключение возможного искажения температуры или температурного поля поверхности в месте измерения термометром.

Для обеспечения равенства температур термометра и измеряемой поверхности необходимо создать наилучшие условия теплопередачи от поверхности объекта измерения к термометру. В связи с этим даже очень малые воздушные зазоры или слои материалов с низкой теплопроводностью между измеряемой поверхностью и термометром могут существенно исказить результаты измерения. Для обеспечения хорошего теплового контакта желательно специально изготовленный термометр приклеивать, припаивать или приваривать к поверхности. Возможна механическая зачеканка слая на поверхности объекта, но только в случае неокисляемости поверхностей объекта и термометра в условиях измерения.

Искажение температуры или температурного поля поверхности объекта измерения будет происходить в том случае, если термометр служит причиной дополнительного подвода или отвода теплоты от измеряемой поверхности. В связи с этим стараются создать такие условия, чтобы не было дополнительного теплообмена в месте измерения температуры поверхности. Иногда, когда нельзя избежать теплообмена через термометр, стараются перене-

сти этот теплообмен из точки (места) измерения температуры в другую точку. На рис. 9.1 показано изменение температуры поверхности за счет отвода теплоты по электродам термоэлектрического термометра. В точке касания электродами поверхности  $A$  температура поверхности  $t'_n$  существенно отличается от значения  $t_n$ , которое имеет место вдали от точки  $A$ . В точке  $A$  температура  $t'_n$  может даже приближаться к температуре окружающей среды  $t_{0,с}$ . На расстоянии  $l$  от точки  $A$  температура поверхности и равная ей температура термометра имеют значение  $t_t$ . Температура поверхности в точке измерения в этом случае практически равна температуре поверхности без термометра.

Для непрерывного измерения температуры поверхности, например, трубопровода термометр часто прижимают к поверхности специальным зажимом (рис. 9.2). Наличие изоляции трубопровода практически исключает отвод (или подвод) теплоты от места измерения и поэтому термометр не искажает температуры поверхности, а хороший тепловой контакт между термометром и поверхностью путем зажима обеспечивает равенство температур термометра и поверхности.

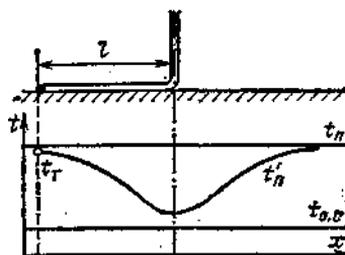


Рис. 9.1. Изменение температуры поверхности при отводе теплоты по электродам термоэлектрического термометра

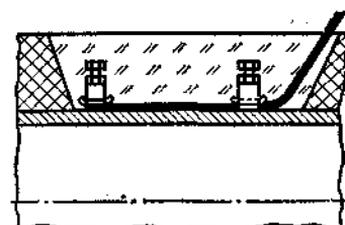


Рис. 9.2. Поверхностный термометр с зажимом на трубопроводе

В лабораторных условиях и при исследованиях особенно малые погрешности имеют место при применении пленочных термометров, расположенных непосредственно на измеряемой поверхности. Эти термометры соприкосновения или термоэлектрические термометры напыляют на измеряемую поверхность. Иногда применяют дополнительные покрытия, чтобы обеспечить ту же излучательную способность и теплопроводность, как и у других участков поверхности, прилегающих к месту измерения. Следует иметь в виду, что часто термо-ЭДС и температурный коэффициент у очень тонких пленок, напыленных на поверхность, будут зависеть от толщины напыленного слоя, термической обработки и теплового расширения материала, на который производилось напыление.

Измерение температуры движущихся поверхностей имеет свои специфические проблемы. Наиболее желательно для этого применять бесконтактные методы измерения — по излучению. Однако во многих случаях применение бесконтактного метода не может быть осуществлено, так как нет прямой видимости измеряемой поверхности или его применению препятствуют другие причины. Поэтому достаточно широко применяются контактные термометры.

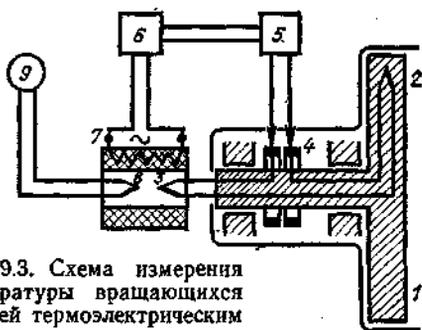


Рис. 9.3. Схема измерения температуры вращающихся деталей термоэлектрическим термометром

При этом, как правило, возникает либо проблема обеспечения теплового контакта между термометром и движущимся телом, либо проблема передачи измерительного сигнала с движущегося тела на стационарную измерительную установку. Если термометр жестко закреплен на измеряемой поверхности (с учетом изложенных выше особенностей измерения температуры поверхностей) и его температура практически равна температуре поверхности, возникает задача передачи показаний термометра на стационарную измерительную установку. Это можно осуществить при малых поступательных перемещениях гибкими соединительными проводами. При вращательном движении передача сигнала осуществляется через вращающееся контактное устройство, простейшим вариантом которого являются контактные кольца. Примером может служить схема, изображенная на рис. 9.3. На вращающейся детали 1 расположен рабочий спай термоэлектрического термометра 2. Свободные концы термометра образуют другой спай 3 термометра, который вращается вместе с деталью. В разрыв одного из электродов через контактные кольца 4 включен электронный усилитель 5. При наличии разности температур спаев 2 и 3 усилитель 5 через электронный блок 6 изменяет нагрев печи 7, в которой находится вращающийся спай 3, до тех пор, пока измери-

тельный ток в цепи не будет равен нулю, т. е. пока температуры спаев 2 и 3 не будут равны. Температура в печи измеряется термометром 8 и измерительным прибором 9. Она будет равна температуре спаев 2. Отсутствие тока в цепи исключает влияние переходных сопротивлений контактных колец. Передача сигнала может осуществляться и бесконтактным способом с помощью телеметрической, чаще всего индуктивной, системы. Однако бесконтактные системы для термоэлектрических термометров сложны и не нашли широкого применения.

## 9.2. Измерение температуры пламени

Измерения температуры пламени имеют свои специфические особенности и трудности. При выборе метода измерения анализируются уровень измеряемых температур, желательная точность и тип пламени. Температура горения природного газа, жидкого топлива и угля, как правило, ниже  $2100^{\circ}\text{C}$ . Исключением составляет температура пламени, обогащенного кислородом, которая может достигать больших значений. Температура факела или пламени в боль-

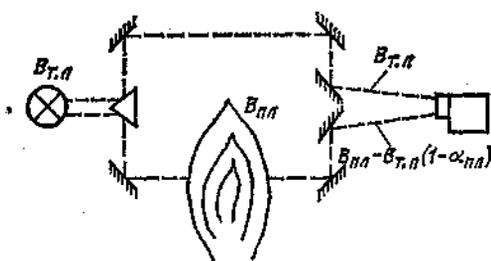


Рис. 9.4. Измерение температуры пламени способом излучения—поглощения

шинстве промышленных установок лежит в интервале  $1600\text{--}1900^{\circ}\text{C}$ .

Пламя представляет собой частично прозрачную среду с пространственным температурным полем, которое меняется во времени. Измерение температуры пламени может осуществляться пирометрами излучения или контактными термометрами. При измерении температуры пламени по излучению происходит пространственное усреднение температуры вдоль оси визирования пирометра. На результаты измерения будут оказывать влияние излучающие компоненты (частицы сажи, двуокись углерода, водяной пар и другие твердые частицы), находящиеся в пламени. Большое значение имеет выбор длины волны, воспринимаемых пирометром. Неизлучающие горячие или холодные зоны газов принципиально не могут быть измерены пирометрами излучения без специального их подкрашивания.

Рассмотрим некоторые способы измерения температуры пламени с указанием их особенностей и возможных погрешностей. Одним из этих способов является так называемый способ излучения — поглощения. Идея метода заключается в уравнивании спектральных энергетических яркостей температурной лампы, наблюдаемой сквозь пламя и непосредственно (рис. 9.4). Обозначив через  $V_{пл}$  — спектральную энергетическую яркость пламени, а через

$B_{\tau, \lambda}$  — спектральную энергетическую яркость лампы температурной лампы, можно записать, что спектральная энергетическая яркость лампы, наблюдаемой сквозь пламя, составляет

$$B_{\text{пл}} + B_{\tau, \lambda}(1 - \alpha_{\text{пл}}), \quad (9.1)$$

где  $\alpha_{\text{пл}}$  — коэффициент поглощения пламени (значение  $\alpha_{\text{пл}}$  неизвестно).

Изменяя температуру лампы температурной лампы таким образом, чтобы выполнялось условие

$$B_{\text{пл}} + B_{\tau, \lambda}(1 - \alpha_{\text{пл}}) = B_{\tau, \lambda}, \quad (9.2)$$

получим

$$B_{\tau, \lambda} = B_{\text{пл}} / \alpha_{\text{пл}}. \quad (9.3)$$

Следовательно, температура пламени равна яркостной температуре температурной лампы. Этот метод позволяет оставлять неизвестным коэффициент поглощения пламени, который в реальных условиях практически неопределим. Поэтому методическая погрешность незначительна. Однако практическая реализация метода на промышленных установках связана с трудностями осуществления такой оптической системы, у которой оба канала не только имели бы одинаковые спектральные характеристики, но и одинаково изменяли бы их в процессе эксплуатации. Этот метод предусматривает применение квазимонохроматического пирометра, и поэтому пламя должно излучать при тех длинах волн, при которых работает пирометр. В разновидности этого метода возможно применение пирометров полного излучения [8], однако в этом случае могут иметь место методические погрешности, обусловленные отклонением излучательных свойств пламени от серого излучения.

Для измерения температуры несветящегося пламени или нагретого газа применяют метод обращения спектральных полос. Для реализации этого метода в пламя вводятся соли натрия, например поваренная соль, которые окрашивают пламя в желтый цвет. Далее используют температурную лампу и спектропирометр и уравнивают спектральную энергетическую яркость при длине волны излучения натрия для лампы и пламени. Температура лампы будет равна температуре пламени при равенстве спектральных энергетических яркостей. Во всех этих случаях пламя должно быть не совсем оптически плотным, чтобы можно было наблюдать через него.

Пирометры спектрального отношения могут применяться для измерения светящегося пламени, например подсвеченного сажей. Следует отметить, что применение любых методов измерения температуры пламени по излучению требует предварительного исследования спектральных характеристик пламени и условий, в которых будут проводиться измерения, с целью выявления факторов, оказывающих влияние на результаты измерения (других источников излучения, промежуточной среды, пыли и т. п.).

Одним из недостатков измерения температуры пламени пирометрами излучения является усреднение температуры вдоль оптической оси. Поэтому нельзя определять, к какой точке пламени относится полученный результат. В этом отношении применение небольших по размерам термоэлектрических термометров имеет существенные преимущества. Однако

температура такого термометра может существенно (на 100—200 °C) отличаться от температуры газа, так как она будет определяться по тепловому балансу термометра. В связи с тем что расчет связан с необходимостью получения дополнительной информации о скорости газа (пламени) в точке измерения, излучательных способностях пламени и термометра, получили распространение способы измерения, позволяющие исключить эти параметры из расчетных выражений. Для этого применяются два термометра с различным диаметром термоэлектродов (размеры спая в этом случае должны равняться диаметру термоэлектродов), которые располагаются практически в одной и той же точке пламени (газа). Тогда действительная температура

$$t_d = t_1 + (t_1 - t_2) \left/ \left[ \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{0.6} \frac{T_2^4 - T_{\text{ст}}^4}{T_1^4 - T_{\text{ст}}^4} - 1 \right] \right. \quad (9.4)$$

Эти выражения предполагают теплообмен излучением между термоэлектродом и стенкой и не учитывают теплообмен между термометром и пламенем. Это справедливо для прозрачных, несветящихся пламен и газов. В оптически плотном пламени термометр «не видит» стенок и поэтому применять выражение (9.4) нецелесообразно. В связи с этим предложено измерять температуру одним термометром, а поправку оценивать по зависимости (9.4).

### 9.3. Измерение температур в энергетических реакторах

Измерение температур в энергетических реакторах и активной зоне имеет свои специфические особенности. Во-первых, это вопросы радиационной безопасности, которые требуют применения методов и средств измерения температуры, отличающихся высокой надежностью, во-вторых, — обеспечение длительной работы средств измерения температуры со стабильными или практически стабильными градуировочными характеристиками.

Вопросы надежности средств измерения температуры сводятся в основном к созданию такой конструкции термометров, которая обеспечивала бы безотказную работу как в течение длительной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях.

Одной из наиболее важных и самых теплонапряженных частей реактора являются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Так как в них расположено делящееся вещество, то они являются и самыми ответственными частями реактора. Допустимый уровень температуры топлива и оболочки определяется применяемыми материалами. Толщина оболочек — от 0,1 мм для стальных оболочек до 1 мм для циркониевых сплавов. Значения температуры в зависимости от вида реактора и его конструктивных особенностей составляют от 350 до 1200 °C. Заниженные температуры оболочек относительно расчетной приводит к падению мощности реактора. Повышенные температуры может вызвать разрушение оболочек и привести к аварийной ситуации. Поэтому измерение температуры оболочек ТВЭЛов является одной из важнейших задач измерения температуры в

энергетических реакторах. Наиболее приемлемыми для этой цели являются кабельные термоэлектрические термометры (см. § 5.2, рис. 5.9, табл. 5.4), обладающие повышенной стойкостью к тепловым ударам, вибрации, механическим нагрузкам. Важными достоинствами кабельных термометров являются возможность получения малых диаметров их (до 0,5 мм), различного поперечного сечения — круглых, плоских, овальных и т. д., а также возможность изготовления переменного по длине диаметра. Кабельные термоэлектрические термометры имеют достаточную длину и гибкость для прокладки в самых труднодоступных местах. В зависимости от конструкции твэлов применяются различные способы заделки кабельных термометров в оболочку твэлов. Это может быть заделка термометра 1 к оболочке 3 способом дистанционирующее ребро 2 на оболочке 3 твэла, в котором находится топливо 4. Возможно крепление термометра 1 к оболочке 3 способом плазменного напыления (рис. 9.5, б) и другие способы. Варианты крепления и размеры термометра определяются конструкцией и размерами оболочки твэла, а также обеспечением минимального искажения температуры оболочки в месте измерения самим термометром и его креплением. Вопросы измерения температуры твэлов и другие аспекты реакторной термометрии подробно рассмотрены в [9].

Кроме обычных выпускаются кабельные многозонные термопреобразователи диаметром 3 и 6 мм с числом рабочих спаев 3 и 5, расстоянием между спаями 1000 и 1500 мм и максимальной длиной термопреобразователя 25 м.

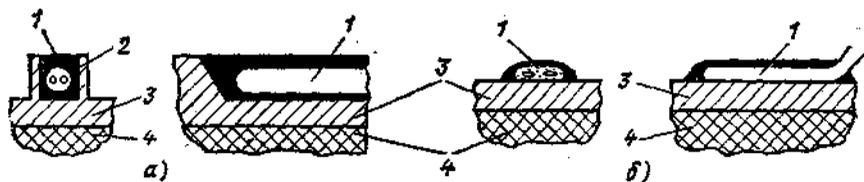


Рис. 9.5. Термоэлектрические термометры для измерения температуры оболочек твэлов: а — заделанный в дистанционирующее ребро; б — закрепленный плазменным напылением

Многозонные кабельные термометры позволяют измерять температуры в различных точках активной зоны (например, распределения температуры графитовой кладки реактора по высоте) одним термометром. Температура является важным параметром, характеризующим свойства графитового замедлителя. Особенности ее измерения определяются относительно высоким значением температуры (до 800 °С), науглероживанием материалов конструкции термометра, неионизирующим облучением и практической невозможностью доступа к местам измерений. Кроме того, большое значение имеет выбор наиболее характерных точек измерения в графитовой кладке.

Для измерения максимальной температуры графита применяется термоэлектрический термометр 1, располагаемый с помощью направляющего устройства 2 в центре канала 3 ячейки графитовой кладки (рис. 9.6). При этом следует учитывать возможные методические погрешности, вызванные термическим сопротивлением слоя газа между рабочим спаем и поверхностью графитовой кладки. Другие варианты конструкции, обеспечивающие непосредственный контакт с поверхностью графита, не

нашли широкого применения в связи с усложнением конструкции и уменьшением ресурса работы.

Для измерения температурных режимов устройств тепловой и биологической защиты, а также металлоконструкций реактора чаще всего применяются также кабельные термоэлектрические термометры, которые иногда армируются дополнительно защитным чехлом.

Большое число температурных измерений в реакторах приходится на контроль температур теплоносителя в различных точках первого и второго контуров. Для этого применяются различные конструктивные варианты «классических» термоэлектрических термометров: термоэлектроды — изоляционные бусы или трубки — защитная гильза. В связи с требованиями радиационной безопасности возникла необходимость разработать специальные конструктивные решения герметичного вывода термоэлектродов из реактора. Термоэлектрические термометры заключены в герметичные трубки. Соединительные линии термометров выводятся через специальные патрубки, вмонтированные в отверстия крышки. Концы труб привариваются к трубной доске. Для контроля уплотнения имеется отвод к сигнализатору протечек. При нарушении герметичности заделки труб вступает в работу резервное уплотнение. Для условий вибрации разработаны высоконадежные дугообразные гильзы большой устойчивости, которые состоят из двух конических частей и цилиндрической части малого диаметра (рис. 9.7). Для обеспечения герметичности контура с активной средой и высокой

надежности средства измерения широкое применение находят многоэлементные термометры и многозонные кабельные термометры, позволяющие сократить число сверлений в трубопроводах и емкостях оборудования АЭС.

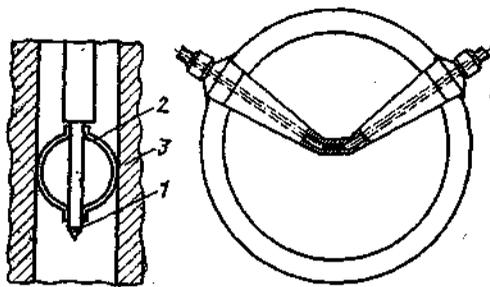


Рис. 9.6. Измерение температуры графитовой кладки реактора

Рис. 9.7. Термоэлектрический термометр с дугообразной гильзой

Как отмечалось выше, большое значение при измерении температуры в реакторах имеет вопрос стабильности градуировочных характеристик средств измерения в условиях ионизирующих излучений большой мощности. Термометры, расположенные в активной зоне, подвергаются воздействию нейтронного потока, осколков деления, электронов и других частиц, воздействию  $\gamma$ -излучения. В результате этого может происходить изменение структуры, состава и соответственно изменение физических свойств и метрологических характеристик термометров. В термоэлектрических термометрах под влиянием радиации могут возникать временные отклонения выходного сигнала и длительные, или интегральные, отклонения. Временные отклонения наблюдаются в термометрах при воздействии излучения и исчезает при прекращении излучения при неизменной измеряемой температуре. Длительные или интегральные отклонения выходного сигнала термометра имеют место при длительном воздействии излучения, когда термометр «набрал» определенный флюенс излучения (количество ионизирующих частиц). Эти отклонения выходного сигнала термометра остаются и при прекращении излучения при постоянной измеряемой температуре. Интегральное отклонение вызывается, как правило, радиационным перерождением отдельных элементов, входящих в состав термоэлектродов. Это отклонение не может быть снято термообработкой электродов.

Как показали исследования, временные отклонения выходного сигнала термоэлектрических термометров в большинстве случаев не превышают 1% измеряемой температуры. Высказывается предположение о том, что эти отклонения вызваны разогревом термометров в результате  $\gamma$ -облучения. Уменьшение этого отклонения достигается уменьшением радиального термического сопротивления термометра, а также уменьшением тепловыделения в самом чувствительном элементе [9].

Анализ интегральных отклонений выходных сигналов показал, что практически не имеют интегральных отклонений хромель-алюмелевые термоэлектрические термометры, которые подвергались облучению с плотностью потока ионизирующих частиц до  $4,5 \cdot 10^{24} \text{ c}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  при температуре 1000 °C. При тех же условиях интегральные отклонения платинородий-платиновые термометров составили 30 °C. Эти результаты подтверждаются исследованием радиационного перерождения материалов термоэлектродов из-за перерождения родия. Наименьшее изменение состава отмечалось в паре хромель-алюмель, оно объясняется устойчивостью никеля, составляющего основу этих сплавов, к радиоактивному распаду [9]. Таким образом, применение хромель-алюмелевых термоэлектрических термометров в реакторных измерениях позволяет практически исключить интегральные отклонения выходного сигнала термометра.

Термометры сопротивления для внутриреакторных измерений практически не применяются в связи с существенным изменением электрического сопротивления под воздействием ионизирующих излучений. В результате ядерных превращений электрическое сопротивление возрастает, что приводит к завышению показаний термометров сопротивления. Из-за лучшей стабильности и большего диапазона изме-

рения предпочтение отдается платиновым термометрам. Медные термометры для измерения температур на АЭС не применяются.

#### 9.4. Измерение криогенных температур

Криогенными называются температуры ниже 90 К. Измерение таких температур имеет свои специфические особенности и трудности, которые возрастают по мере приближения к абсолютному нулю. Наибольшее распространение для измерения низких температур получили термометры сопротивления в термоэлектрические термометры. Термометры сопротивления применяют для измерения температур от 0,01—0,02 К и выше. Особенностью использования термометров сопротивления из металла является то, что сопротивление термометра при низких температурах становится настолько малым, что затрудняет их измерение. При этом уменьшается коэффициент пре-

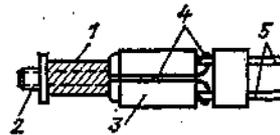


Рис. 9.8. Стержневой платиновый термометр сопротивления для измерения криогенных температур

образования термометров, что влияет на точность измерения. Возрастает влияние дефектов кристаллической решетки материала термометра на его сопротивление при низких температурах.

Уменьшение теплоемкости материалов при низких температурах может привести к существенному отланию собственной температуры чувствительного элемента термометра от температуры измеряемой среды за счет самонагрева и подвода теплоты по проводам и защитной арматуре.

Из металлических термометров широко применяются платиновые термометры сопротивления от 10 К и выше. В отдельных работах платиновые термометры сопротивления применялись до 2 К. Для измерения низких температур разработана специальная конструкция платинового термометра сопротивления (рис. 9.8). Платиновая проволока 1 диаметром 0,05 мм, покрытая винифлексовым лаком толщиной 0,008 мм, наматывается бифурно на платиновый стержень-каркас 2, один конец которого запрессован в специальный изолятор 3. Платиновые выводы 4 подключены к соединительным штырям 5. Стержень и проволока покрыты винифлексовым лаком, который создает надежную электрическую изоляцию и не взаимодействует с платиной. Для улучшения теплообмена платиновый каркас-стержень припаян к металлическому чехлу. Для уменьшения теплопритока извне применяются соединительные провода малого сечения (диаметр 0,1 мм). Термометр такой конструкции получился очень миниатюрным: длина чувствительного элемента ( $R_0=100 \text{ Ом}$ ) термометра 8 мм, диаметр 1,6 мм, диаметр защитного чехла 2—3 мм. Другие термометры сопротивления из металла в СССР практически

не применяются. За рубежом некоторое распространение получили никелевые термометры сопротивления (в интервале 77—300 К) и термометры из манганина (в интервале 4,2—300 К).

Все термометры из металлов изменяют свое сопротивление под влиянием магнитного поля, причем чем ниже температура, тем больше это влияние. Для платинового термометра это влияние наибольшее: при температуре 13 К магнитная индукция до 2 Т вызывает увеличение сопротивления до 40 %, при 50 К прирост сопротивления при той же магнитной индукции составляет доли процента. У других термометров сопротивления из металла магниторезистивный эффект почти на порядок меньше, но он имеет место.

Для измерения температур ниже 13 К в СССР в основном применяются германиевые термометры сопротивления. Они предназначены для измерения температур в интервале от 0,1 до 300 К. Изготавливаются они из кристаллического германия с многокомпонентным легированием. Сопротивление германия увеличивается с повышением температуры и при гелиевых температурах исчисляется сотнями и тысячами ом. Коэффициент преобразования при этих температурах составляет  $10^2$ — $10^3$  Ом/К. Серийные германиевые термометры сопротивления имеют предел допускаемых погрешностей 0,05—0,1 К. Эталонные германиевые термометры сопротивления имеют стабильность градуировочной характеристики до 0,001 К. Хотя конструктивное выполнение термометров различно, но в общем случае кристалл германия, к которому приварены выводы, помещается в защитную гильзу (корпус), заполненную гелием, улучшающим теплообмен с измеряемой средой (см. рис. 6.5). Германиевые термометры сопротивления также подвержены влиянию магнитных полей. Это влияние меньше, чем для платиновых термометров, но при поле в 10—15 Т погрешность из-за влияния может составить при 4,2 К около 0,15—0,2 К и более.

При наличии магнитных полей для измерения низких температур целесообразно применять угольные термометры сопротивления. У угольных термометров влияние магнитных полей в 15 Т изменяет их показания не более чем на 4—7 % для температур от 0,01 до 1,5 К. Угольные термометры сопротивления, так же как и германиевые, имеют отрицательный температурный коэффициент и изготавливаются из каменного угля путем специальной термообработки. Одним из главных достоинств угольных термометров является то, что их коэффициент преобразования практически обратно пропорционален температуре. Для малых объектов применяют пленочные угольные термометры сопротивления, изготавливаемые путем нанесения слоя коллоидного раствора графита на подложку или непосредственно на поверхность объекта. К числу недостатков угольных термометров следует отнести нестабильность их градуировочной характеристики.

Из термоэлектрических термометров наибольшее распространение для измерения температур от 20 до 300 К получили медь-константановый термометр. Однако его коэффициент преобразования существенно уменьшается с понижением температуры. Если при комнатных температурах он составляет около 40 мкВ/К, то при 20 К он уже составляет только 5 мкВ/К. Поэтому измерение этим термометром при

20 К сопряжено с трудностями, а при более низких температурах практически невозможно.

Некоторое распространение получил термометр медь-золото+1,9 % кобальта). Однако стабильность этого термометра невысока. Кроме того, значительно влияние не постоянства температуры свободных концов на показания термометра. Для промышленных измерений в интервале от 1 до 50 К хорошо зарекомендовал себя термометр (золото+0,07 % железа)-хромель, который имеет практически линейную характеристику при хорошей стабильности. Для уменьшения погрешности, вызванной непостоянством температуры свободных концов, их помещают в среду с температурой, близкой к измеряемой, например в жидкий азот.

Однако, несмотря на ряд преимуществ, термоэлектрические термометры уступают термометрам сопротивления в точности и в стабильности градуировочной характеристики.

Манометрические термометры (газовые и конденсационные) довольно широко используются для лабораторных и технических измере-

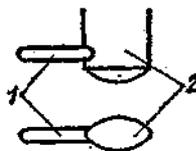


Рис. 9.9. Термометр для измерения температур расплавов синтетических материалов

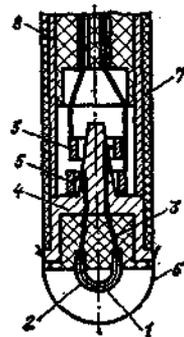


Рис. 9.10. Термометр для измерения температур расплавов стали и цветных металлов

ний криогенных температур. Главным преимуществом газовых термометров является возможность их применения без предварительной градуировки в широкой области температуры. Например гелиевый термометр может перекрыть всю область температур от 90 до 1 К. Для точных измерений необходимо учитывать отличие свойств реального газа, заполняющего термометр, от идеального газа. Следует иметь в виду, что размеры термобаллона значительны и возможно влияние температуры окружающей среды, поэтому область применения газовых термометров ограничена.

Конденсационные термометры используют экспериментальную зависимость давления насыщенного пара от температуры. Диапазоны измерения конденсационных термометров в криогенной области достаточно узки, например для гелиевых термометров 1—5 К, для водородных 15—35 К. Точность измерения температуры зависит от точности определения градуировочной характеристики термометра.

Термометры магнитной восприимчивости применяются для измерения температур ниже 1 К. Необходимость проведения магнитных измерений практически исключает использование термометров магнитной восприимчивости в промышленных установках. А необходимые размеры также ограничивают область их применения.

При измерении криогенных температур большое внимание следует уделять методическим погрешностям измерения температуры, которые определяются особенностями тепло-

обмена чувствительного элемента термометра не только с измеряемой средой, но и с окружающей средой и элементами конструкции установки (см. § 8.1—8.3).

## 9.5. Измерение температуры расплавов

Сложность измерения температуры расплавов определяется в основном активной коррозионной защитного чехла термометра. Методические погрешности при измерении температуры расплавов практически можно не принимать во внимание, так как теплоотдача от расплава к чехлу термометра, как правило, очень хорошая. Исключения составляют синтетические материалы большой вязкости (пластмассы, синтетика, синтетический каучук и др.), в которых коэффициент теплоотдачи невелик. Конструкция термометра в этом случае должна обеспечить неабсолютную герметичность термометра материалом и минимальную погрешность путем теплоотвода через чехол. На рис. 9.9 представлен один из вариантов такого термометра, состоящий из чувствительного элемента в тонком чехле 1 и держателя 2 обтекаемой формы.

При измерении расплавов солей защитные чехлы через несколько десятков часов выходят из строя из-за агрессивного действия расплава. Поэтому часто делают легко сменяемый чехол из некачественной дешевой стали, например термометр с толстостенным защитным чехлом из обычной дешевой стали, который одновременно является одним из электродов термоэлектрического термометра.

Для измерения расплавов стекла могут применяться защитные чехлы из углеродных блоков или из благородных металлов. Графитовые (углеродные) защитные чехлы применяются для измерения температуры в ваннах печах. Внутри графитового чехла должен быть расположен газоплотный внутренний чехол для защиты термопары из благородных металлов от воздействия восстановительной атмосферы углерода. Термометры такой конструкции имеют большую тепловую инерцию.

В питательных устройствах, где на поверхности расплава стекла имеется окислительная атмосфера, могут применяться чехлы из благородных металлов или комбинированные. Термоэлектроды в фарфоровой изоляционной трубке помещаются в защитный чехол из платины. Снаружи располагаются керамический защитный чехол и монтажная стальная трубка, которая крепится к головке термометра. Такой термометр отличается малой инерционностью.

Измерение температуры расплавов цветных и легких металлов также вызывает большие трудности из-за сильной коррозии металлических защитных чехлов. Кварцевые чехлы не пригодны, так как, соединяясь, например, с окисью алюминия, кварц превращается в низкоплавкое стекло. Жидкие медные сплавы отбирают у кварца кислород, разрушая его структуру. Для некоторых расплавов цветных металлов применяются чехлы из хромистого чугуна. Широкое распространение для эпизодического измерения температуры жидкой стали и расплавов цветных металлов получили термоэлектрические термометры кратковременного погружения со сменными блоками (рис. 9.10). Очень тонкая термопара 1 (диаметром 0,08—0,1 мм) расположена в кварцевой труб-

ке 2 и с помощью термоэлектродов подсоединена к пружинным контактным кольцам 5. Термопара с кварцевой трубкой защищена от механических повреждений тонкостенным защитным колпачком 6. Сменный блок, состоящий из пластмассового блока 4, термостойкой замазки 3, термопары 1, трубки 2 и защитного колпачка 6, вставляется в защитный чехол из многослойной бумаги 7 и одновременно контакты блока соединяются с контактами основного переносного чехла 8. При температуре 1600—1700 °С такой термометр может находиться 10—15 с в жидкой стали. При этом часть бумажного чехла обгорает, расплавляется защитный колпачок, но интервал времени 10 с достаточен для надежного и точного измерения температуры. После измерения сменный блок вместе с бумажным защитным чехлом снимают с основного чехла и заменяют новым. Для измерения применяются термометры платинородий-платинородиевые (тип В) и вольфрамовый-вольфрамомолибденовые (ВР 5/20).

В настоящее время на ряде металлургических заводов в СССР и за рубежом применяются термоэлектрические термометры для непрерывного измерения температуры расплавленной стали. Термометр помещается в водоохлаждаемую защитную форму. Рабочий спай отечественных термометров защищен трехслойным наконечником: внешний слой — из металлокерамики, внутренний — из окиси алюминия, в промежутке — засыпка из окиси алюминия, термоэлектроды платинородий-платинородиевые (ПР 30/6). В зарубежных конструкциях применяются газоплотные капилляры из глинозема и металлокерамический чехол. Термометры для непрерывного измерения температуры расплавленной стали часто оснащаются специальным приводом и могут выдвигаться в измеряемую среду или выдвигаться из нее в процессе работы сталеплавильного или сталеразливочного агрегата.

В связи с малой надежностью контактных термометров в расплавах для измерения температуры жидкой стали и других расплавов часто применяются пирометры. Вид применяемого пирометра зависит от условий измерения. Например, на конвертерах с донной продувкой возможно производить измерение через одно из дутьевых сопел пирометром полного излучения, так как излучательная способность поверхности металла в этом случае мало отличается от единицы [5]. Однако температура металла в этом случае измеряется непосредственно в зоне реакции углерода с кислородом и поэтому имеет более высокое значение, чем средняя температура металла в конвертере. Одновременные измерения действительной температуры расплава термоэлектрическим термометром и яркостной температуры расплава квазимонохроматическим пирометром позволяют по температуре и коэффициенту теплового излучения делать заключение о качестве стали или расплава, об их химическом составе. Для уменьшения влияния шлака на показания может быть использовано устройство для запоминания пиковых значений, фиксирующих только значения измеряемой температуры металла [5].

Температура расплавленного стекла может измеряться пирометрами полного или частичного излучения, если толщина слоя расплава такова, что стекломасса непрозрачна для излучения. Отмечено еще одно свойство излучения стекла: в интервале длин волны от 4 до

8 мкм все сорта стекла имеют коэффициент теплового излучения  $\epsilon=0,96$ . Поэтому пирометры частичного излучения, работающие в этой области спектра, могут быть отградуированы в значениях действительной температуры [5]. Часто пирометр визируется на дно керамической калильной трубки (см. рис. 7.8, б), погруженной в расплав. В той части ванны, где нет факела, возможно измерение температуры расплава путем визирования пирометра прямо на расплавленное стекло. В этой части имеет место равенство излучения между ванной и сводом, поэтому их влияние на результаты измерения будет отсутствовать.

Пирометры излучения могут быть использованы также для измерения температур пластмасс и других полимерных материалов. Спектральные характеристики большинства полимерных материалов имеют характерные полосы поглощения, в которых коэффициент теплового излучения практически равен единице, например для полистирола 3,4; 6,8 и 14,2 мкм;

для поливинилхлорида 3,4; 7 и 8 мкм; для нейлона 3; 3,4; 6,2; 6,6 мкм и т. д. Поэтому квазимонохроматические пирометры с эффективной длиной волны, соответствующей одной из указанных выше, могут измерять сразу действительную температуру. В отдельных случаях при измерении температуры прозрачных и полупрозрачных материалов перед пирометром устанавливают фильтры, выделяющие ту или иную спектральную область, в которой эти материалы обладают излучательной способностью, близкой к абсолютно черному телу.

В заключение следует отметить, что выбор того или иного метода измерения и его конструктивное исполнение определяются конкретными условиями измерения температуры расплавов, их взаимодействием с различными материалами, их излучательными способностями и другими физическими и химическими свойствами. И в каждом случае может быть свое, отличное от других случаев решение этой проблемы.

## Раздел третий

# ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, РАСХОДА И УРОВНЯ

### Глава десятая

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

### 10.1. Общие сведения

Большинство современных устройств для измерения теплотехнических параметров представляют собой системы, состоящие из первичного преобразователя, вторичного прибора и соединяющей их линии связи.

Первичный преобразователь устанавливается около места измерения. Он (или его часть) непосредственно контактирует с контролируемой средой и предназначен для преобразования измеряемой величины в сигнал другой физической природы (обычно электрический, реже — пневматический), удобный для передачи по линии связи к вторичному прибору, устанавливаемому на щите управления.

В общем виде первичный преобразователь содержит чувствительный элемент и передающий измерительный преобразователь. Чувствительный элемент непосредственно воспринимает измеряемый параметр и преобразует его в сигнал другой физической природы. Если этот сигнал удобен для передачи на расстояние, то он по линии связи передается к вторичному прибору и измеряется им (например, это имеет место при применении термоэлектрических термометров и термометров сопротивления, которые непосредственно подключаются к вторичным приборам — потенциометрам и мостам).

Если чувствительный элемент преобразует измеряемую величину в физическую, которую нельзя передать на расстояние, например перемещение или усилие, то возникает необходимость в применении промежуточного передающего преобразователя. Этот преобразователь преобразует промежуточную величину (перемещение или усилие) в электрический или пневматический сигнал, который затем по линии связи передается к вторичному прибору. В качестве примера на рис. 10.1 представлена схема измерительного комп-

лекта для измерения давления. В качестве чувствительного элемента используется мембрана 1. При изменении давления  $p$  мембрана будет прогибаться, причем смещение ее центра  $x$  однозначно связано с давлением в соответствии со статической характеристикой  $x=f(p)$ . Если бы такой прибор был только показывающим, то для определения давления было бы достаточно соединить стрелку с центром мембраны посредством кинематической связи. При дистанционном измерении давления возникает необходимость в преобразовании механической величины — перемещения  $x$  — в пропорциональный электрический сигнал для передачи его по линии связи 4 к вторичному прибору 5. Это преобразование осуществляется передающим преобразователем 2. Для преобразования линейного перемещения в унифицированный выходной сигнал наибольшее распространение получили преобразователи дифференциально-трансформаторные и преобразователи с магнитной компенсацией. Для преобразования угловых перемещений удобны преобразователи ферродинамические и частотные, для преобразования усилия — преобразователи с силовой компенсацией (электрические и пневматические). Тип преобразователя выбирается в зависимости от вида преобразуемого механического сигнала (линейное или угловое перемещение, усилие) и заданного вида сигнала, передаваемого по линии связи (ток, напряжение, давление и т. д.).

Важной особенностью современных измерительных преобразователей и приборов является унификация их выходных сигналов, что обеспечивает взаимозаменяемость средств измерений, удобство централизованного контроля и позволяет сократить номенклатуру вторичных приборов.

Наиболее перспективными являются преобразователи с унифицированным выходным сигналом постоянного тока

0—5, 0—20 и 4—20 мА, применяются также преобразователи с выходным сигналом напряжения постоянного тока (наиболее распространенные диапазоны его изменения 0—10, 0—5 В), частотным электрическим выходным сигналом (обычно с диапазоном изменения частоты 4—8 кГц). Широко применяются преобразователи с выходным сигналом переменного тока. Этот сигнал представляется либо в виде изменения взаимной индуктивности (обычно в диапазоне 0—10 мГ), либо в виде изменения напряжения переменного тока (обычно —1 ÷ +1 В; 0—2 В; 1—3 В,



причем изменение знака означает изменение фазы). В некоторых отраслях промышленности используются также преобразователи с унифицированным пневматическим выходным сигналом, изменяющимся в пределах 20—100 кПа (0,2—1,0 кгс/см<sup>2</sup>).

Вторичные приборы часто оснащаются дополнительными выходными преобразователями, преобразующими угловые или линейные перемещения выходных кинематических устройств приборов в электрический сигнал, который по линии связи может передаваться к дополнительным показывающим приборам 6 (рис. 10.1), дублирующим показания вторичного прибора 5, или иным устройством (например, устройством регулирования, интегратором и т. д.). Выходные преобразователи могут быть аналогичными передающим измерительным преобразователем, но могут иметь и специфическую конструкцию.

## 10.2. Дифференциально-трансформаторные преобразователи и схемы дистанционной передачи

Дифференциально-трансформаторные преобразователи (ДТП) предназначены для преобразования линейного перемещения сердечника (связанного с чувствительным элементом) в выходной электрический сигнал.

Принцип действия их основан на зависимости взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой от положения сердечника. Преобразователь представляет собой трансформатор (рис. 10.2, а), имеющий обмотку возбуждения 3 и две секции 1 и 2 вторичной обмотки, включенные встречно, дифференциально (отсюда название — дифференциально-трансформаторный).

Создаваемый ток возбуждения  $I_b$  магнитный поток обмотки возбуждения пронизывает обе секции вторичной обмотки. Часть этого потока  $\Phi_1$  прони-

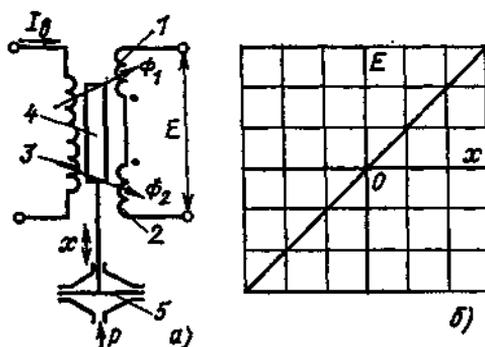


Рис. 10.2. Схема невзаимозаменяемого дифференциально-трансформаторного преобразователя

зывает секцию 1, индуцируя в ней ЭДС  $e_1$ , часть потока  $\Phi_2$  пронизывает секцию 2, индуцируя в ней ЭДС  $e_2$ . Значения этих ЭДС (по модулю) могут быть легко определены через взаимные индуктивности  $M_1$  и  $M_2$  между обмоткой возбуждения и секциями 1 и 2 (потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  однозначно связаны со значениями  $M_1$  и  $M_2$ ), в соответствии с выражениями

$$e_1 = 2\pi f I_b M_1; e_2 = 2\pi f I_b M_2,$$

где  $I_b$  — ток возбуждения;  $f$  — его частота.

При изменении давления  $p$  прогибается мембрана 5, которая перемещает ферромагнитный сердечник (плунжер) 4. При перемещении сердечника вверх уменьшается сопротивление магнитному потоку между обмотками 3 и 1 и, наоборот, увеличивается между обмотками 3 и 2. Это приводит к увеличению потока  $\Phi_1$  и соответственно ЭДС  $e_1$  и уменьшению  $\Phi_2$  и  $e_2$ . При перемещении сердечника вниз уменьшается  $e_1$  и увеличивается  $e_2$ . Поскольку сек-

ции вторичной обмотки включены встречно, то ЭДС  $E$  всей вторичной обмотки будет определяться как разность  $e_1$  и  $e_2$ :

$$E = e_1 - e_2 = 2\pi f I_B (M_1 - M_2) = 2\pi f M, \quad (10.1)$$

где  $M$  — взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой преобразователя.

В среднем положении сердечника (когда он поровну перекрывает обе секции) потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_1$ , а следовательно, и взаимные индуктивности  $M_1$  и  $M_2$  равны между собой, т. е.  $M=0$  и  $E=0$ . При смещении сердечника от среднего положения вверх ЭДС  $E$  будет увеличиваться. При смещении сердечника от среднего положения вниз

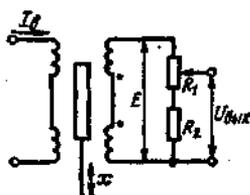


Рис. 10.3. Схема взаимозаменяемого дифференциально-трансформаторного преобразователя

ЭДС также будет увеличиваться (по модулю), но фаза ее будет обратной (рис. 10.2, б).

Из-за допусков, принятых при изготовлении, обычно оказывается, что ЭДС  $E$  вторичной обмотки для различных экземпляров ДТП различна при одинаковых перемещениях  $x$ . Очевидно, что это вызывает невзаимозаменяемость ДТП. Для унификации выходных сигналов (строго определенной для всех преобразователей зависимости выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного  $x$ ) в цепь вторичной обмотки введен делитель  $R_1, R_2$  (рис. 10.3). Смещением движка резистора  $R_1$  можно добиться одинаковой зависимости  $U_{\text{ВЫХ}} = f(x)$ . Обычно  $U_{\text{ВЫХ}}$  выражается через взаимную индуктивность  $M_{\text{ВЫХ}}$  между обмоткой возбуждения и выходной цепью, а не между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой, которая использована в выражении (10.1). Для модуля  $U_{\text{ВЫХ}}$  это выражение имеет вид  $U_{\text{ВЫХ}} = 2\pi f I_B M_{\text{ВЫХ}}$ .

При рассмотрении метрологии ДТП обычно пользуются относительным перемещением сердечника  $x/x_N$ , где  $x_N$  —

номинальное перемещение сердечника (перемещение сердечника при значении измеряемого параметра, соответствующем верхнему пределу измерения прибора). Для разновидностей ДТП  $x_N = (1,6; 2,5; 4 \text{ мм}) \pm 25\%$ . Для унифицированных ДТП в предположении отсутствия магнитных потерь существует следующая зависимость между  $M_{\text{ВЫХ}}$  и относительным перемещением сердечника:

$$M_{\text{ВЫХ}} = M_N x/x_N, \quad (10.2)$$

где  $M_N$  — номинальная (соответствующая  $x_N$ ) взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и выходной цепью.

Следовательно,

$$U_{\text{ВЫХ}} = 2\pi f I_B M_N x/x_N. \quad (10.3)$$

Очевидно, что для унифицированных ДТП зависимости (10.2) и (10.3) дол-

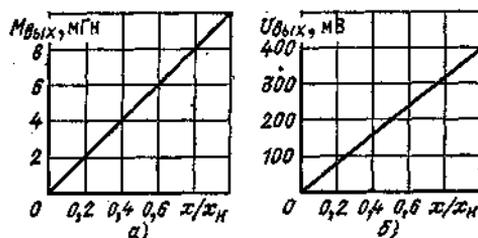


Рис. 10.4. Статические характеристики взаимозаменяемых ДТП

жны быть одинаковыми, что достигается установлением одинакового значения  $M_N = 10$  мГн для всех преобразователей. При этом графики зависимостей (10.2) и (10.3) для всех преобразователей должны совпадать (рис. 10.4).

В приборах с взаимозаменяемыми ДТП при начальном значении измеряемой величины плунжер устанавливается в среднем положении и с ее увеличением перемещается вверх, т. е. при изменении измеряемой величины в пределах диапазона измерения фаза выходного сигнала не изменяется (рис. 10.4).

В реальных дифференциально-трансформаторных преобразователях, как и во всех трансформаторах, существуют магнитные потери, которые обычно учитываются путем представления выражений (10.2) и (10.3) в комплексной

форме с использованием аргумента взаимной индуктивности или угла потерь. Значения этих величин должны находиться в определенных пределах.

В качестве статической характеристики ДТП можно было бы принять зависимость (10.3), т.е. при проверке ДТП экспериментально определять зависимость  $U_{\text{вых}} = f(x/x_n)$  и сравнивать ее с идеальной (рис. 10.4, б). Однако при этом необходима стабилизация частоты  $f$  и тока возбуждения  $I_b$ , что представляет определенные трудности. Поэтому практически оказывается более целесообразным в качестве статической характеристики принять зави-

стоящий из обмотки ДО, намотанной поверх вторичной обмотки ДТП, и регулируемого резистора  $R_3$ .

Дифференциально-трансформаторный преобразователь первичного преобразователя обычно называется передающим преобразователем, ДТП вторичного прибора — компенсирующим преобразователем. При рассмотрении действия схемы будем считать, что сигнал корректора нуля равен нулю. Вторичные обмотки ДТП передающего и компенсирующего преобразователей включены встречно и, следовательно, на вход усилителя поступает сигнал, равный разности выходных на-

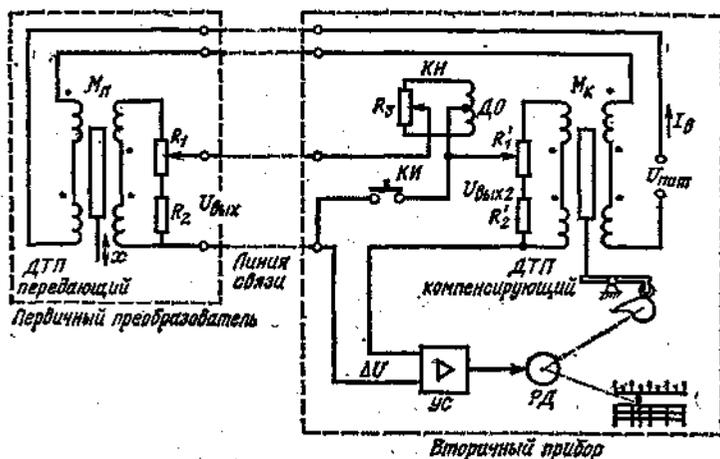


Рис. 10.5. Схема дистанционной передачи показаний с использованием взаимозаменяемых ДТП

симость (10.2), так как взаимная индуктивность от  $f$  и  $I_b$  не зависит. При этом за выходной сигнал преобразователей принимается взаимная индуктивность  $M_{\text{вых}}$  между выходной цепью и обмоткой возбуждения, изменяющаяся в пределах 0—10 мГн.

Схема дистанционной передачи с использованием унифицированных ДТП представлена на рис. 10.5.

Вторичный прибор содержит дифференциально-трансформаторный преобразователь, сердечник которого перемещается профилированным кулачком (линейным или квадратичным), поворачиваемым реверсивным двигателем РД. Двигатель управляется усилителем УС, подключенным между обмотками ДТП первичного преобразователя и вторичного прибора. В схему прибора включен корректор нуля КН, со-

пряжений преобразователей:

$$\Delta U = U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}$$

Предположим, что в первоначальный момент сердечники обоих ДТП находятся в среднем положении, т.е.  $U_{\text{вых1}} = U_{\text{вых2}} = 0$ .

При этом  $\Delta U = 0$  и указатель прибора стоит на начальной отметке. При увеличении измеряемой величины  $U_{\text{вых1}}$  начинает возрастать, на входе усилителя появляется отличный от нуля сигнал небаланса  $\Delta U$ , который усиливается усилителем и приводит в движение реверсивный двигатель РД. Двигатель, поворачивая кулачок, перемещает сердечник ДТП вторичного прибора, который будет установлен в такое положение, при котором  $U_{\text{вых2}} = U_{\text{вых1}}$ . При этом  $\Delta U = 0$  и двигатель остановится. Очевидно, что при

одинаковых статических характеристиках (рис. 10.4, б) в момент компенсации относительные перемещения  $x/x_n$  преобразователей будут равны (при этом равными также будут взаимные индуктивности передающего  $M_n$  и компенсирующего  $M_k$  преобразователей в соответствии с рис. 10.4, а). Это означает, что каждому положению сердечника ДТП первичного преобразователя соответствует определенное положение сердечника ДТП вторичного прибора и жестко связанного с ним указателя.

Так как положение сердечника первичного преобразователя определяется значением измеряемой величины, положение указателя вторичного прибора будет однозначно определяться значением измеряемой величины. Шкалы таких приборов градуируются в единицах измеряемой величины.

Применение корректора нуля  $KH$  не изменяет принципа действия прибора, однако в этом случае относительные положения  $x/x_n$  сердечников уже не будут равными.

Из выражения (10.3) видно, что статические характеристики преобразователей (рис. 10.4, б) будут одинаковыми при одинаковой частоте и силе тока возбуждения. Для обеспечения этого обмотки возбуждения передающего и компенсирующего ДТП включаются последовательно (рис. 10.5). В этом случае изменение частоты или силы тока возбуждения не повлияет на состояние компенсации измерительной схемы, так как они в равной степени изменят  $U_{вых1}$  и  $U_{вых2}$ , т.е. напряжение на входе усилителя останется нулевым.

Кнопка  $KH$  служит для контроля исправности прибора. При нажатии этой кнопки закорачивается ДТП первичного преобразователя и корректор нуля и на вход усилителя поступает сигнал только со вторичной обмотки ДТП вторичного прибора. При исправном приборе стрелка при этом должна стать на начальную отметку шкалы. Существует несколько типов взаимозаменяемых вторичных приборов с дифференциально-трансформаторной схемой, различающихся размерами, типом кулачка, видом диаграммы. Однако все они имеют измерительную схему, аналогичную изображенной на рис. 10.5. Квадратичный кулачок используется только во вторичных при-

борах-расходомерах, для которых положение указателя пропорционально квадратному корню из перемещения сердечника передающего преобразователя. В приборах-уровнемерах, перепадаомерах, манометрах устанавливаются линейные кулачки, т.е. имеется линейная зависимость между положением указателя и перемещением сердечника передающего первичного преобразователя.

Выпускаются следующие типы приборов: миниатюрные показывающие КПД 1, ВМД и показывающие и самопишущие КСД 1; малогабаритные показывающие с вращающимся цилиндрическим циферблатом КВД 1 и показывающие и самопишущие КСД 2; приборы с дисковой диаграммой КСД 3. Приборы КСД 1 и КСД 2 имеют прямоугольную шкалу, ширина диаграммы — соответственно 100 и 160 мм. Класс всех приборов I. Приборы могут быть снабжены либо дополнительными выходными преобразователями (ферродинамическими, частотными, пневматическими, реостатными) либо регулирующими устройствами. В приборах-расходомерах часто используется встроенное интегрирующее устройство. В эксплуатации находятся также приборы, снабженные невзаимозаменяемыми дифференциально-трансформаторными преобразователями. Электрическая схема таких преобразователей представлена на рис. 10.2, а.

Особенностью таких преобразователей является то, что при нулевом значении измеряемой величины сердечник находится не в среднем положении (как у взаимозаменяемых ДТП), а в крайнем нижнем, в большей степени перекрывая секцию 2. При значении измеряемой величины, соответствующем верхнему пределу измерения, сердечник находится в крайнем верхнем положении, в большей степени перекрывая секцию 1. В обоих случаях выходной сигнал максимален по значению, но фазы его противоположны (рис. 10.2, б).

Кроме того, у таких преобразователей отсутствует выходной делитель напряжения, в силу чего статические характеристики отдельных экземпляров преобразователей не совпадают. Это вызывает необходимость индивидуальной градуировки измерительного комплекта, состоящего из первичного пре-

образователя и вторичного прибора, снабженных невзаимозаменяемыми преобразователями. При замене, например, первичного измерительного преобразователя необходимо перенастраивать кинематическую схему вторичного прибора.

Схема дистанционной передачи показаний с использованием невзаимозаменяемых ДТП аналогична представленной на рис. 10.5 с учетом того, что схемы и характеристики передающего и компенсирующего ДТП должны соответствовать рис. 10.2. Несколько иную схему может иметь корректор нуля. Невзаимозаменяемые преобразователи используются в показывающих автоматических приборах типа ДП, ЭИВ (с вращающимся цилиндрическим циферблатом), в показывающих и самопишущих приборах ДСМ (миниатюрные), ДС (малогобаритные), ЭПИД.

Дифференциально-трансформаторные преобразователи просты по устройству, надежны в работе. Из-за компенсационного принципа действия система дистанционной передачи показаний с их использованием имеет малую погрешность от изменения напряжения питания и активного сопротивления линии связи (если оно не превышает 5 Ом). Однако им присущи и недостатки. Так, к первичному преобразователю с ДТП можно подключать одновременно только один вторичный прибор. При использовании ДТП с управляющими машинами необходимо применение промежуточных нормирующих преобразователей, преобразующих сигнал 0—10 мВн в сигнал 0—5 мА. Кроме того, система дистанционной передачи с ДТП, как и все системы передач на переменном токе, подвержена влиянию внешних магнитных полей и соседних линий связи (например, при совместной прокладке их в одном кабеле). Результатом такого влияния может быть значительная дополнительная погрешность. Следует также отметить, что в системах передач на переменном токе накладываются ограничения на емкость между каждой парой проводов, так как их чрезмерное увеличение также приводит к появлению дополнительной погрешности. Указанных недостатков лишены преобразователи с магнитной компенсацией с передачей сигналов на постоянном токе.

### 10.3. Передающие преобразователи с магнитной компенсацией

Передающие преобразователи с магнитной компенсацией предназначены для преобразования линейного перемещения чувствительного элемента первичного прибора в унифицированный выходной сигнал постоянного тока. Принцип действия таких преобразователей заключается в том, что управляющий магнитный поток, создаваемый в специальном устройстве — индикаторе магнитных потоков при перемещении подвижного элемента — постоянного магнита (перемещаемого чувствительным элементом первичного преобразователя), компенсируется магнитным потоком обратной

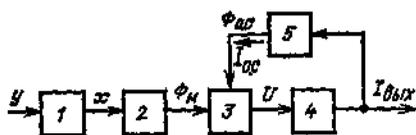


Рис. 10.6. Структурная схема преобразователя с магнитной компенсацией

связи, создаваемым в этом же индикаторе током обратной связи. При этом устанавливается определенная зависимость между выходным током и перемещением подвижного элемента (постоянного магнита), а значит, и значением измеряемой величины.

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 10.6. Упругий чувствительный элемент 1 первичного преобразователя преобразует измеряемую величину  $y$  в линейное перемещение  $x$  постоянного магнита 2 преобразователя. При перемещении магнита изменяется управляющий магнитный поток  $\Phi_M$ , который в индикаторе магнитных потоков 3 сравнивается с магнитным потоком обратной связи  $\Phi_{о.с.}$ . На выходе индикатора появляется напряжение  $U$ , пропорциональное разности магнитных потоков  $\Delta\Phi = \Phi_M - \Phi_{о.с.}$ , которое усилителем 4 преобразуется в выходной токовый сигнал  $I_{вых}$ .

Выходной ток  $I_{вых}$  поступает в линию дистанционной передачи и одновременно в устройство обратной связи 5, выходной ток которого  $I_{о.с.}$  создает магнитный поток  $\Phi_{о.с.}$ , компенсирующий магнитный поток  $\Phi_M$ . Таким образом, при увеличении измеряемой

величины  $y$  увеличивается смещение магнита  $x$ , увеличивается управляющий магнитный поток  $\Phi_M$  и, следовательно, необходимы большие выходные ток  $I_{\text{вых}}$  и ток обратной связи  $I_{\text{о.с}}$  для создания магнитного потока  $\Phi_{\text{о.с}}$ , компенсирующего  $\Phi_M$ .

Устройство обратной связи 5 позволяет установить необходимый закон преобразования  $I_{\text{вых}} = f(y)$ . Эта зависимость может быть либо линейной (в приборах для измерения давления, разности давлений, уровня), либо квадратичной (в расходомерах по перепаду давления на сужающем устройстве).

Магнитная система преобразователя состоит из двух магнитопроводов,

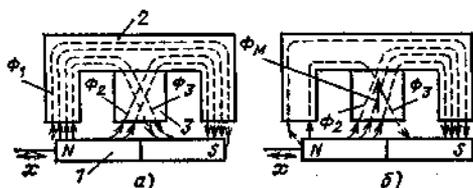


Рис. 10.7. Схема образования управляющего магнитного потока

двух индикаторов магнитных потоков и расположенного между ними подвижного магнита. Для упрощения рассмотрения принципа образования магнитного потока  $\Phi_M$  рассмотрим схему магнитных потоков лишь в одном магнитопроводе (рис. 10.7), поскольку схема потоков в другом магнитопроводе аналогична. Основной магнитный поток  $\Phi_1$  постоянного магнита 1 замыкается через магнитопровод 2. Меньшие потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  замыкаются через магнитопровод индикатора магнитных потоков 3. Потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  направлены навстречу друг другу. Магнитный поток  $\Phi_M$  представляет собой разность потоков  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$ , т. е. результирующий поток, протекающий по магнитопроводу индикатора,  $\Phi_M = \Phi_2 - \Phi_3$ .

В среднем положении магнита (рис. 10.7, а) потоки  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  равны и противоположно направлены, поэтому результирующий поток  $\Phi_M = \Phi_2 - \Phi_3$  практически отсутствует. При смещении магнита, например, вправо (рис. 10.7, б) от нейтрального положения поток  $\Phi_2$  становится больше потока  $\Phi_3$  и по магнитопроводу индикатора 3 начинает протекать результирующий магнитный поток  $\Phi_M = \Phi_2 - \Phi_3$  опреде-

ленного направления. Интенсивность этого потока зависит от степени смещения магнита от нейтрального положения. Поскольку магнит смещается чувствительным элементом и, следовательно, это смещение определяется значением измеряемой величины,  $\Phi_M$  также зависит от этого значения. На магнитопроводе индикатора размещены обмотка возбуждения, питаемая пульсирующим током, и обмотка обратной связи, по которой протекает постоянный ток обратной связи. Уже указывалось, что преобразователь с магнитной компенсацией содержит один подвижный магнит, два вспомогательных магнитопровода и два индикатора магнитных потоков I и II

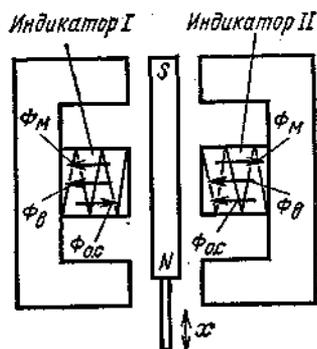


Рис. 10.8. Конструктивная схема преобразователя с магнитной компенсацией

(рис. 10.8). Таким образом, электрическая схема преобразователя содержит по две обмотки возбуждения и обратной связи, расположенные на двух разных индикаторах магнитных потоков. Магнитные потоки постоянного магнита  $\Phi_M$  и обмотки обратной связи  $\Phi_{\text{о.с}}$  в каждом индикаторе направлены навстречу друг другу, а магнитный поток обмотки возбуждения  $\Phi_v$  в одном индикаторе (например, I) складывается с  $\Phi_M$ , а в другом они вычитаются (рис. 10.8).

Преобразование магнитного потока  $\Phi_M$  в постоянный выходной ток рассмотрим, используя электрическую схему преобразователя (рис. 10.9). Обмотки возбуждения  $w_v$  индикаторов I и II и резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют измерительный мост. В одну диагональ этого моста подводится напряжение питания  $U_v$ , а с другой снимается выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$ .

Работа преобразователя основана на использовании явления магнитно-

го насыщения материала магнитопровода индикатора магнитных потоков. Предположим, что первоначально потоки  $\Phi_{0.c}$  и  $\Phi_m$  равны нулю. В этом случае в магнитопроводе индикаторов присутствуют только магнитные потоки  $\Phi_B$ , создаваемые токами возбуждения  $I_1$  и  $I_2$ . Рассмотрим изменение этих токов во времени. Из-за наличия диодов токи  $I_1$  и  $I_2$  проходят через обмотку возбуждения только в положительный полупериод напряжения  $U_B$ .

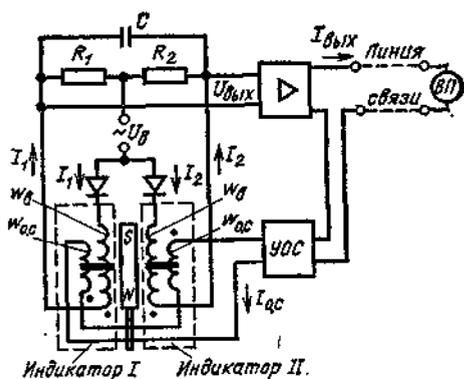


Рис. 10.9. Электрическая схема преобразователя с магнитной компенсацией

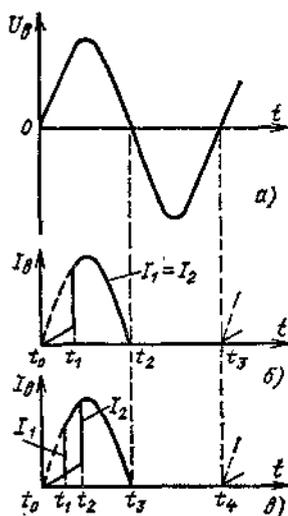


Рис. 10.10. Временная диаграмма токов и напряжений в схеме преобразователя с магнитной компенсацией

В промежутке  $t_0-t_1$  (рис. 10.10 а, б) с возрастанием  $U_B$  возрастают токи возбуждения  $I_1$  и  $I_2$ , при этом также увеличиваются магнитные потоки  $\Phi_B$ .

В момент  $t_1$  магнитные потоки  $\Phi_B$  насыщают магнитопроводы индикаторов, при этом индуктивность и пол-

ное сопротивление обмоток резко уменьшаются и значения токов резко возрастают. В интервале  $t_1-t_2$  токи изменяются по синусоиде, в интервале  $t_2-t_3$  токи равны нулю из-за запирающих диодов, в момент  $t_3$  процесс изменения токов повторяется. Таким образом, в любой момент времени  $I_1=I_2$ , поэтому сигнал  $U_{\text{вых}}$ , снимаемый с балластных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , в любой момент также равен нулю (так как  $U_{\text{вых}}=I_1R_1-I_2R_2$  и  $R_1=R_2$ ). При смещении магнита в обоих магнитопроводах появляется поток  $\Phi_m$  постоянного магнита. Предположим, что в индикаторе I он складывается с потоком  $\Phi_B$  обмотки возбуждения, а в индикаторе II вычитается (рис. 10.8). Это приводит к тому, что в магнитопроводе индикатора I состояние насыщения наступает раньше (момент  $t_1$  на рис. 10.10, а), чем в магнитопроводе индикатора II (момент  $t_2$  на рис. 10.10, б). Вследствие этого резкое увеличение тока  $I_1$  происходит раньше тока  $I_2$ . Следовательно, в интервале  $t_1-t_2$  ток  $I_1 > I_2$  и, следовательно, падение напряжения на  $R_1$  будет больше, чем на  $R_2$ , т. е.  $U_{\text{вых}} \neq 0$ . Это напряжение усредняется емкостью  $C$  и поступает на вход усилителя, который преобразует его в выходной ток  $I_{\text{вых}}$ . Пропорциональный ток  $I_{\text{вых}}$  ток обратной связи  $I_{0.c}$  вызовет появление потока  $\Phi_{0.c}$ , компенсирующего поток  $\Phi_m$ . При этом восстановится приближенное равенство  $I_1 \approx I_2$  для любого момента времени.

Нетрудно заметить, что увеличение  $\Phi_m$  (при увеличении значения измеряемой величины) требует увеличения  $\Phi_{0.c}$ , что обеспечивается увеличением  $I_{\text{вых}}$  и  $I_{0.c}$ . Таким образом, устанавливается однозначная зависимость между значениями измеряемой величины и выходного тока.

Статическая характеристика преобразователя  $I_{\text{вых}}=f(x)$  определяется видом зависимости  $I_{0.c}=f(I_{\text{вых}})$ . Если  $I_{0.c}=k_1 I_{\text{вых}}$ , то  $I_{\text{вых}}=k_2 x$ , если  $I_{0.c}=k_3 I_{\text{вых}}^2$ , то  $I_{\text{вых}}=k_4 \sqrt{x}$  ( $k_1-k_4$ — постоянные коэффициенты,  $x$ — смещение магнита). Выходной сигнал преобразователей (унифицированный ток 0—5 мА) через линию дистанционной передачи поступает к вторичным приборам или другим устройствам.

Преобразователи с магнитной компенсацией обладают рядом достоинств: возможностью подключения не-

скольких вторичных приборов к одному преобразователю, достаточно высокой виброустойчивостью и надежностью. Недостатки — довольно высокая температурная погрешность и невозможность работы в среде, вредно влияющей на элементы электронной схемы усилителей (находящиеся в корпусе первичного преобразователя). К недостаткам следует также отнести большое влияние на погрешность первичного преобразователя погрешностей чувствительного элемента и индикатора магнитных потоков, так как они не охвачены обратной связью. Это ограничивает возможность создания точных приборов с такими преобразователями. Преобразователи этого типа имеют класс 1 и 1,5.

В качестве вторичных приборов используются миллиамперметры с соответствующим диапазоном измерения (см. § 5.7) или многошкальные узкопрофильные приборы системы АСК, имеющие класс 1 и 1,5 (например, М1530, М1741 и т. д.).

#### 10.4. Ферродинамические преобразователи и схемы дистанционной передачи

Ферродинамические преобразователи применяются для преобразования угловых перемещений в унифицированный выходной электрический сигнал. Они могут быть использованы в качестве передающих в том случае, если значение измеряемой величины может быть преобразовано в пропорциональное угловое перемещение подвижного элемента преобразователя — рамки. В то же время используемые в приборах теплотехнического контроля чувствительные элементы преобразуют измеряемую величину либо в линейное перемещение, либо в усилие (за исключением кольцевого дифманометра, преобразующего перепад давления в угол поворота подвижного кольца). Поэтому использование ферродинамических преобразователей обычно сопряжено с необходимостью использования кинематических устройств, преобразующих линейное перемещение чувствительного элемента в угловое. В силу этого ферродинамические преобразователи не нашли широкого применения в качестве передающих. Наибольшее распространение они получили в металлургии

как средства измерения, которые одновременно могут выполнять простейшие арифметические операции в измерительных устройствах, использующих косвенный метод измерения (например, в тепломерах). Однако в связи с широким применением вычислительных машин и микропроцессоров все вычислительные операции оказывается целесообразным выполнять с помощью более точных ЭВМ.

Принцип действия ферродинамических преобразователей основан на за-

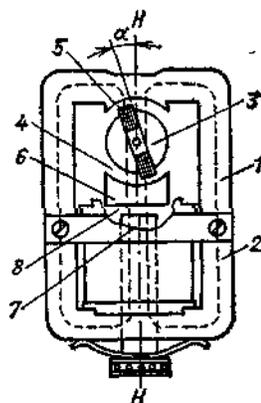


Рис. 10.11. Схема устройства взаимозаменяемого преобразователя типа ПФ

висимости взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и рамкой от угла поворота последней, что приводит к зависимости наводимой в ней ЭДС от угла поворота. Взаимозаменяемый ферродинамический преобразователь типа ПФ (рис. 10.11) содержит магнитопровод 1, на центральной части которого расположена обмотка возбуждения 2. Катушка возбуждения питается переменным током (64 или 320 мА в зависимости от модификации преобразователя). На нее может быть намотана обмотка смещения, включаемая последовательно с рамкой. Центральная ветвь магнитопровода имеет цилиндрическую выточку, в которой расположен неподвижный сердечник 3, вокруг которого в зазоре 4 может поворачиваться рамка 5 (поворот рамки осуществляется чувствительным элементом первичного преобразователя). Между башмаком 6 и плунжером 7 имеется воздушный зазор 8, который может изменяться при вращении плунжера 7. При этом будет меняться магнитный поток в центральной ветви магнитопровода.

Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, замыкается по магнитопроводу (силовые линии показаны пунктиром) и индуцирует ЭДС в рамке (и обмотке смещения, если она имеется). Вблизи нейтрали  $НН$  (рис. 10.11) магнитное поле можно считать однородным, причем вектор индукции  $B$  направлен вдоль нее. В этом случае в соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС, наводимая в рамке, определяется выражением

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} = - \frac{d(nBS \sin \alpha)}{dt} = - nS \sin \alpha \frac{dB}{dt},$$

где  $\Psi$  — потокосцепление рамки;  $n$  — число витков рамки;  $S$  — площадь

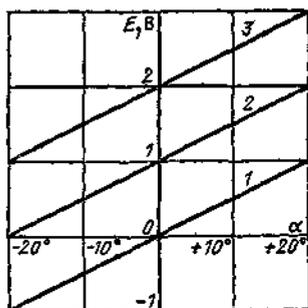


Рис. 10.12 Статические характеристики ферродинамических преобразователей

рамки;  $\alpha$  — угол между плоскостью рамки и вектором магнитной индукции  $B$  магнитного поля.

При малых углах поворота  $\alpha$  (не более  $20^\circ$ ) можно принять  $\sin \alpha = \alpha$ , т. е.  $e = -nS\alpha(dB/dt)$ . При переменном магнитном поле с частотой  $f$  и амплитудой  $B_m$  имеем  $B = B_m \sin 2\pi ft$  и, таким образом,  $e = -nS\alpha B_m 2\pi f \cos \times (2\pi ft)$ .

Амплитудное значение

$$E = 2\pi f n S B_m \alpha. \quad (10.4)$$

Таким образом, при ЭДС, наводимая в рамке, линейно зависит от  $\alpha$ . Рамка ферродинамических преобразователей поворачивается в пределах  $\pm 20^\circ$  относительно нейтрали. Магнитная система рассчитана таким образом, что наводимая в рамке ЭДС изменяется от  $-1$  В до  $+1$  В (линия 1 на рис. 10.12). Существуют преобразователи, у которых последовательно с рамкой

включена обмотка смещения, смещающая характеристику на 1 В (линия 2) и на 2 В (линия 3). Выражение для амплитудного значения ЭДС может быть записано в другом виде:

$$E = 2\pi f I_B M, \quad (10.5)$$

где  $I_B$  — амплитудное значение тока возбуждения;  $M$  — взаимная индуктивность между рамкой и обмоткой возбуждения. Сравнением (10.4) и (10.5) можно установить линейную зависимость между  $M$  и углом  $\alpha$ . Обычно эта зависимость записывается в виде

$$M = M_n \alpha / \alpha_n, \quad (10.6)$$

где  $\alpha_n$  — номинальный угол поворота, равный  $20^\circ$ ;  $M_n$  — номинальная взаим-

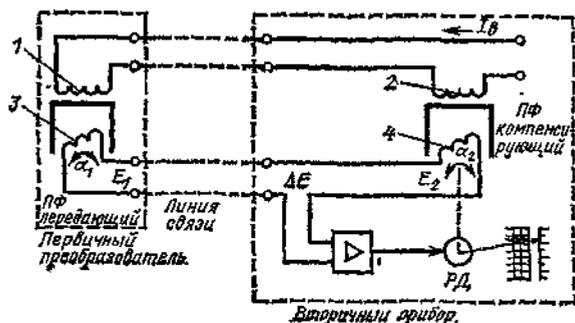


Рис. 10.13. Схема дистанционной передачи показаний с использованием ферродинамических преобразователей

ная индуктивность (соответствующая углу поворота  $\alpha_n$ ).

Значения  $M_n$  нормируются для каждого типа преобразователя. Выходным сигналом ферродинамических преобразователей считается взаимная индуктивность, унификация их осуществления путем обеспечения определенного значения  $M_n$ . Увеличение или уменьшение  $M_n$  и  $E$  осуществляется изменением зазора (при уменьшении зазора  $M_n$  и  $E$  растут, при этом критична характеристика увеличивается). Принципиальная схема дистанционной передачи показаний с использованием ферродинамических преобразователей без обмоток смещения представлена на рис. 10.13. Обмотки возбуждения 1 и 2 передающего и компенсирующего преобразователей включены последовательно, чтобы исключить влияние на показания прибора изменения амплитуды и частоты

тока возбуждения. Рамки 3 и 4 включены встречно, вследствие чего на вход усилителя подается разность ЭДС  $E_1$  передающего преобразователя и ЭДС  $E_2$  компенсирующего преобразователя:

$$\Delta E = E_1 - E_2. \quad (10.7)$$

При  $\Delta E = 0$  на выходе усилителя сигнала нет и двигатель находится в покое. При изменении значения измеряемой величины изменяется положение чувствительного элемента первичного прибора, который поворачивает рамку передающего преобразователя, изменяя таким образом  $E_1$ .

На входе усилителя появляется сигнал небаланса  $\Delta E$ , который усиливается и приводит во вращение вал реверсивного двигателя РД, кинематически соединенный с рамкой компенсирующего преобразователя и указателем.

Двигатель будет изменять положения рамки до момента равенства ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . При этом двигатель остановится (так как  $\Delta E$  станет равным нулю) и стрелка прибора установится на отметке, соответствующей значению измеряемого параметра. Очевидно, что при одинаковых характеристиках передающего и компенсирующего преобразователей в момент компенсации их рамки занимают одинаковое положение относительно нейтрали (линии  $HN$  на рис. 10.11). В ферродинамической системе дистанционной передачи в качестве вторичных приборов используются миниатюрные показывающие приборы типа ВФП или самопишущие типа ВФС. Класс этих приборов по показаниям 1. В самопишущих приборах используется прямолинейная шкала длиной 100 мм (ширина поля записи также 100 мм), показывающие приборы имеют шкалу в форме дуги длиной 270 мм. Эти приборы могут быть снабжены выходными преобразователями, либо устройствами для сигнализации или регулирования.

Ферродинамические преобразователи обладают теми же недостатками, что и дифференциально-трансформаторные.

### 10.5. Электросиловые преобразователи

Электросиловые преобразователи предназначены для преобразования усилия чувствительного элемента

первичного прибора в унифицированный сигнал постоянного тока 0—5 или 0—20 мА.

Действие электросиловых преобразователей основано на принципе силовой компенсации: усилие, развиваемое чувствительным элементом под действием измеряемой величины, уравнивается усилием, действующим на этот же чувствительный элемент со стороны устройства обратной связи.

Принципиальная схема преобразователя с линейной характеристикой представлена на рис. 10.14. В качестве примера рассмотрен первичный прибор для измерения давления — манометр с сильфоном 1 в качестве чувствительного элемента, преобразующего измеряемое давление в усилие

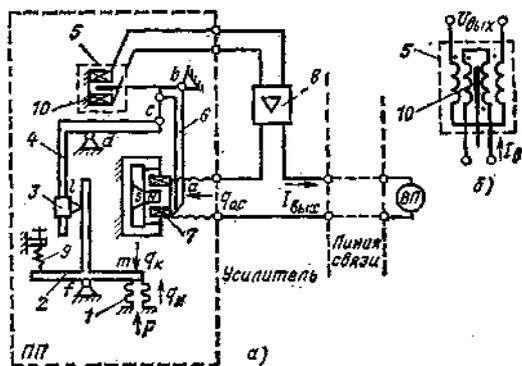


Рис. 10.14. Принципиальная схема электросилового преобразователя с линейной характеристикой

$q_k$  (в таких приборах могут использоваться любые чувствительные элементы, преобразующие измеряемую величину в усилие). Преобразователь состоит из рычажной системы, образованной рычагами 2, 4, 6, подвижной опоры 3, расположенной между рычагами 2 и 4 (опора может смещаться вдоль рычага 4), индикатора рассогласования 5 дифференциально-трансформаторной системы, устройства обратной связи 7 магнитоэлектрической системы, усилителя 8 и корректора нуля 9.

Принцип силовой компенсации применительно к этой схеме состоит в том, что в момент равновесия усилие, развиваемое чувствительным элементом  $q_k$ , равно усилию  $q_k$ , действующему на него со стороны обратной связи.

При изменении измеряемой величины вначале нарушается равенство усилий, что вызывает незначительное перемещение рычажной системы и управляющего плунжера 10 индикатора рассогласования 5. Индикатор рассогласования представляет собой дифференциально-трансформаторный преобразователь (рис. 10.1, б), выходной сигнал которого зависит от положения плунжера вследствие увеличения взаимной индуктивности между обмотками той секции, к которой плунжер смещается, и уменьшения взаимной индуктивности обмоток другой секции. Выходной сигнал индикатора поступает на вход усилителя 8, который усиливает его и преобразует в выходной ток  $I_{\text{вых}}$ , поступающий к вторичному прибору и последовательно с ним включенному устройству обратной связи 7. Это устройство представляет собой цилиндрическую катушку, закрепленную на рычаге 6, которая находится в кольцевом зазоре постоянного магнита. При протекании через катушку тока  $I_{\text{вых}}$  образуется компенсирующее усилие

$$q_{o.c} = nBI_{\text{вых}} = k_1 I_{\text{вых}}, \quad (10.8)$$

где  $l$  — средняя длина витка рамки;  $n$  — число витков;  $B$  — магнитная индукция в зазоре;  $k_1 = nBl$  — постоянный коэффициент.

При изменении положения плунжера индикатора 5 ток  $I_{\text{вых}}$  изменяется таким образом, чтобы восстановилось нарушенное равенство  $q_{\text{н}} = q_{\text{к}}$ . Можно установить зависимость между  $I_{\text{вых}}$  и измеряемым давлением  $p$  при известных геометрических размерах рычагов.

Зависимость между  $q_{\text{к}}$  и  $q_{o.c}$  легко установить при известных плечах рычагов:

$$q_{\text{к}} = q_{o.c} \frac{ab}{bc} \frac{dc}{fm} \frac{lf}{dl},$$

где  $b, d, f$  — опоры рычагов;  $a, m$  — точки приложения сил  $q_{o.c}$  и  $q_{\text{к}}$ ;  $c, l$  — точки подвижного соединения рычагов.

Так как длина плеч  $ab, bc, cd, fm$  остается неизменной, то

$$q_{\text{к}} = q_{o.c} k_2 \frac{lf}{dl}.$$

Используя (10.8), можем записать

$$q_{\text{к}} = I_{\text{вых}} k_1 k_2 \frac{lf}{dl} = kI_{\text{вых}} \frac{lf}{dl},$$

где  $k$  — постоянный коэффициент.

Усилие  $q_{\text{н}}$  и значение измеряемого давления  $p$  связаны между собой через эффективную площадь чувствительного элемента  $S_{\text{эф}}$ :

$$q_{\text{н}} = pS_{\text{эф}}.$$

В момент компенсации

$$q_{\text{к}} = q_{\text{н}}, \quad kI_{\text{вых}} \frac{lf}{dl} = pS_{\text{эф}}.$$

Отсюда

$$I_{\text{вых}} = \frac{S_{\text{эф}}}{k} \frac{dl}{lf} p. \quad (10.9)$$

Таким образом, статическая характеристика преобразователя линейна. Из (10.9) видно, что возможна переградировка преобразователя путем перемещения подвижной опоры 3 вдоль рычагов 2 и 4 (переградировка означает изменение диапазона измеряемой величины при прежнем диапазоне изменения выходного тока). Например, для увеличения диапазона измерения необходимо уменьшать отношение  $dl/lf$ , т. е. передвигать опору вверх. Корректор нуля служит для установки выходного сигнала, соответствующегоначальному значению измеряемой величины.

Принцип действия и схема преобразователя с квадратичной характеристикой аналогичны изображенным на рис. 10.1. Разница заключается в устройстве обратной связи, которое в этом случае является механизмом электромагнитной системы (стержень втягивается в катушку с током). В этом случае  $q_{\text{к}} = kI_{\text{вых}}^2$ , что и обеспечивает желаемую зависимость между выходным током и измеряемой величиной. Наиболее распространенные типы первичных приборов с электросиловыми преобразователями имеют класс 0,6; 1; 1,5. В качестве вторичных приборов могут быть использованы любые миллиамперметры, описанные в § 5.7. Преобразователи с силовой компенсацией обладают тем достоинством, что при их использовании нелинейность характеристик чувствительных элементов не влияет на погрешность первичного прибора из-за незначительности перемещений. Это обеспечивает более высокую точность таких преобразователей по сравнению с любыми из ранее рассмотренных. Кроме того, незначительность перемещений чувствительного элемента

дает возможность широкого изменения диапазона измерения (до десятикратного) без замены чувствительного элемента.

Вместе с тем сложность кинематической схемы преобразователя обуславливает их низкую виброустойчивость и эксплуатационную надежность.

## 10.6. Тензопреобразователи

Действие измерительных тензопреобразователей основано на изменении электрического сопротивления чувствительного элемента (например, проволоки или ленты из тензочувствительного материала) при его деформации. Обычно они используются в качестве передающих

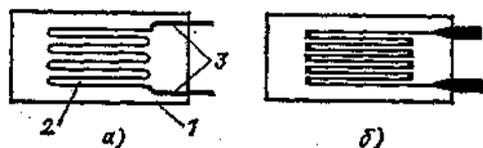


Рис. 10.15. Схема устройства тензопреобразователей:

а — проволоочного; б — фольгового

преобразователей для измерения деформаций элементов конструкций или чувствительных элементов первичных приборов. Так, тензопреобразователи могут быть использованы для дистанционного измерения давления, если их механически соединить с манометри-

ческой пружиной или мембраной, которые деформируются под действием давления.

Основными требованиями к тензочувствительным материалам являются стабильность характеристик, малый температурный коэффициент электрического сопротивления, высокая чувствительность. Обычно в качестве материалов используются константан, сплавы меди и никеля, никеля и хрома и т. д.

Наряду с металлическими тензопреобразователями находят применение и полупроводниковые. Последние обладают более высокой тензочувствительностью по сравнению с металлическими, малыми размерами и массой. В качестве примера их использования можно указать на приборы давления (см. § 11.5).

По устройству металлические тензопреобразователи подразделяются на наклеиваемые и ненаклеиваемые. Наибольшее распространение получили наклеиваемые тензорезисторы, которые выполняются из зигзагообразно уложенной и приклеенной клеем на подложку 1 (из бумаги или пластмассы) проволоки 2 диаметром 0,01—0,05 мм (рис. 10.15, а). К концам проволоки приварены выводные проводники 3 диаметром 0,5 мм. На рис. 10.15, б показано устройство фольгового тензопреобразователя. Эти преобразователи изготавливаются из металлической фольги толщиной 0,001—0,01 мм вытравливанием.

Тензопреобразователь наклеивается на деформирующийся элемент, при деформации которого изменяются размеры и электрическое сопротивление проволоки, причем это изменение зависит от степени деформации. Изменение сопротивления обычно измеряется с помощью мостовой схемы. Относительное изменение сопротивления тензопреобразователей невелико (например, для металлических оно не превышает 1%), поэтому температурный коэффициент материала проволоки должен быть близким к нулю. Кроме того, для уменьшения влияния температуры применяются специальные схемы термокомпенсации.

## Глава одиннадцатая

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

#### 11.1. Общие сведения

Давление относится к числу распространенных измеряемых физических величин. Контроль за протеканием большинства технологических процессов в тепловой и атомной энергетике, металлургии, химии связан с измерением давления или разности давлений газовых и жидких сред.

Давление является широким понятием, характеризующим нормально распределенную силу, действующую со стороны одного тела на единицу поверхности другого. Если действующая среда — жидкость или газ, то давление, характеризуя внутреннюю энергию среды, является одним из основ-

ных параметров состояния. Единицей измерения давления в системе СИ является паскаль (Па), который равен давлению, создаваемому силой в один ньютон, действующей на площадь в один квадратный метр ( $\text{Н/м}^2$ ). Широко применяются кратные единицы кПа и МПа. Допускается использование таких единиц, как килограмм-сила на квадратный сантиметр ( $\text{кгс/см}^2$ ) и квадратный метр ( $\text{кгс/м}^2$ ), последняя численно равна миллиметру водяного столба (мм вод.ст.). В табл. 11.1 приведены перечисленные единицы давления и соотношения между ними.

Воспроизведение единицы измерения давления с наивысшей точностью в области избыточных давлений  $10^3$ —

Таблица 11.1. Единицы измерения давления

Единица	Па	Бар	кгс/см <sup>2</sup>	кгс/м <sup>2</sup> (мм вод. ст.)	мм рт. ст.
1 Па	1	10 <sup>-5</sup>	1,0197 · 10 <sup>-5</sup>	0,10197	7,5006 · 10 <sup>-3</sup>
1 Бар	10 <sup>5</sup>	1	1,0197	1,0197 · 10 <sup>4</sup>	750,06
1 кгс/см <sup>2</sup>	9,8066 · 10 <sup>4</sup>	0,98066	1	10 <sup>4</sup>	735,56
1 кгс/м <sup>2</sup> (мм вод. ст.)	9,8066	0,98066 · 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	1	7,3556 · 10 <sup>-2</sup>
1 мм рт. ст.	133,32	1,3332 · 10 <sup>-3</sup>	1,3595 · 10 <sup>-3</sup>	13,595	1

2,5 · 10<sup>8</sup> Па осуществляется государственным первичным эталоном, включающим грузопоршневые манометры, специальный набор мер массы и установку для поддержания давления. Для воспроизведения единицы давления вне указанного диапазона от 10<sup>-8</sup> до 4 · 10<sup>9</sup> Па и от 10<sup>9</sup> до 4 · 10<sup>9</sup> Па, а также разности давлений до 4 × 10<sup>4</sup> Па используются специальные эталоны. Передача единицы измерения давления от эталонов рабочим средствам измерения осуществляется многоступенчато: от первичного и специальных эталонов вторичным эталонам, затем последовательно образцовым средствам с первого по четвертый разряды включительно и затем рабочим средствам измерения.

Последовательность и точность передачи единицы измерения давления от эталонов к рабочим средствам с указанием способов поверки и сравнения показаний определяются общегосударственными поверочными схемами (ГОСТ 8.017-79, 8.094-73, 8.107-74, 8.187-76, 8.223-76). Поскольку на каждой ступени передачи единицы измерения погрешности возрастают в 2,5—5 раз, соотношение между погрешностями рабочих средств измерения давления и первичного эталона составляет 10<sup>2</sup>—10<sup>3</sup>.

При измерениях различают абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давления. Под *абсолютным давлением*  $p_a$  понимают полное давление, которое равно сумме атмосферного давления  $p_{ат}$  и избыточного  $p$ :

$$p_a = p + p_{ат}$$

Понятие *вакуумметрического давления* вводится при измерении давления ниже атмосферного:

$$p_b = p_{ат} - p_a$$

Средства измерения, предназначенные для измерения давления и раз-

ности давлений, называются *манометрами*. Последние подразделяются на *барометры*, *манометры избыточного давления*, *вакуумметры* и *манометры абсолютного давления* в зависимости от измеряемого ими соответственно атмосферного, избыточного, вакуумметрического и абсолютного давлений. Манометры, предназначенные для измерения давления или разрежения в диапазоне до 40 кПа (0,4 кгс/см<sup>2</sup>), называются *напоромерами* и *тягомерами*. Тягонапоромеры имеют двустороннюю шкалу с пределами измерения до ±20 кПа (±0,2 кгс/см<sup>2</sup>). Дифференциальные манометры применяются для измерения разности давлений.

В зависимости от принципа, используемого для преобразования силового воздействия давления на чувствительный элемент в показания или пропорциональные изменения другой физической величины, средства измерения давления разделяются на жидкостные, деформационные, грузопоршневые, электрические, ионизационные и тепловые.

Устройство перечисленных приборов давления разнообразно. Среди них можно выделить пять основных групп общепромышленных измерительных приборов и преобразователей ГСП: механические, с дифференциально-трансформаторными преобразователями, с компенсацией магнитных потоков, с силовой компенсацией и с тензопреобразователями («Сапфир-22»). Каждая из групп при общей элементной базе и установочных размерах обеспечивает измерение и преобразование давления в унифицированный сигнал в пределах, регламентируемых ГОСТ 18140-77, 2405-72, 2648-78 и указанных в табл. 11.2. Для перехода от МПа к кгс/см<sup>2</sup> и от кПа к кгс/м<sup>2</sup> члены соответствующих рядов умножаются на 10<sup>-1</sup> и на 10<sup>2</sup>.

Таблица 11.2. Пределы измерения приборов давления

Прибор	Единица измерения	Предел измерения	
		нижний	верхний
Манометры	МПа	0	$(0,6; 1; 1,6; 2,5; 4) \cdot 10^n$ $n = -1; 0; 1; 2; 3$
Вакуумметры	МПа	-0,06; -0,1	0
Мановакуумметры	МПа	-0,1	0,06; 0,15; 0,3; 0,5; 0,9; 1,5; 2,4
Манометры абсолютного давления	кПа	0	6; 10; 16; 25; 40
	МПа	0	$(2,5; 4; 6; 10; 16; 15) \times 10^n$ $n = -2; -1$
Напоромеры, дифманометры-вапорометры	кПа	0	$(1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40) \cdot 10^n$ $n = -1; 0$
Тягомеры, дифманометры-тягомеры	кПа	$-(1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40) \cdot 10^n$ $n = -1; 0$	0
Тягонапоромеры, дифманометры-тягонапоромеры	кПа	$-(0,8; 1,25; 2; 3; 5; 8; 12,5; 20) \cdot 10^n$ $n = -1; 0$	$(0,8; 1,25; 2; 3; 5; 8; 12,5; 20) \cdot 10^n$ $n = -1; 0$
Дифманометры-расходомеры	кПа	0	$(1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25)$
	МПа	0	$(0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3) \cdot 10^{-1}$

## 11.2. Жидкостные манометры и дифманометры

В жидкостных манометрах измеряемое давление или разность давлений уравнивается давлением столба жидкости. В приборах используется принцип сообщающихся сосудов, в которых уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними,

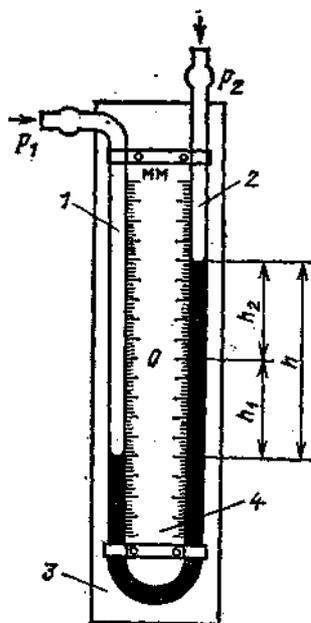


Рис. 11.1. Схема двухтрубного манометра

ми, а при неравенстве занимают такое положение, когда избыточное давление в одном из сосудов уравнивается гидростатическим давлением избыточного столба жидкости в другом. Большинство жидкостных манометров имеют видимый уровень рабочей жидкости, по которому производится непосредственное снятие показаний. Эти приборы используются в лабораторной практике и при проведении промышленных испытаний. Существует группа жидкостных дифманометров. В них уровень рабочей жидкости непосредственно не наблюдается. Изменение последнего вызывает перемещение поплавка или изменение характеристик другого устройства, обеспечивающих либо непосредственное показание измеряемой величины, с помощью отсчетного устройства, либо преобразование и передачу ее значения на расстояние. Рассмотрим разновидности жидкостных манометров.

**Двухтрубные жидкостные манометры.** Для измерения давления и разности давлений используют двухтрубные манометры и дифманометры с видимым уровнем, часто называемыми U-образными. Принципиальная схема такого манометра представлена на рис. 11.1. Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1, 2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреп-

лена шкальная пластинка 4. Трубки заполняются рабочей жидкостью до нулевой отметки. В трубку 1 подается измеряемое давление, трубка 2 сообщается с атмосферой. При измерении разности давлений к обеим трубкам подводятся измеряемые давления.

Столб жидкости высотой  $h$  уравнивает разность давлений

$$p_1 - p_2 = \rho g h; \quad h = \frac{1}{\rho g} (p_1 - p_2), \quad (11.1)$$

где  $\rho$  — плотность рабочей жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  — местное ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

В качестве рабочей жидкости используются вода, ртуть, спирт, трансформаторное масло. Таким образом, в жидкостных манометрах функции чувствительного элемента, воспринимающего изменения измеряемой величины, выполняет рабочая жидкость. Выходной величиной является разность уровней, входной — давление или разность давлений. В соответствии с выражениями (11.1) крутизна статической характеристики зависит от плотности рабочей жидкости. С увеличением плотности чувствительность (коэффициент передачи) снижается, поскольку  $S = \Delta h / \Delta P = 1 / (\rho g)$ .

Если плотность среды над рабочей жидкостью соизмерима с плотностью последней, то выражение (11.1) видоизменяется:

$$p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho_2) g h = g (\rho_1 - \rho_2) (h_1 + h_2), \quad (11.2)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  — соответственно плотности рабочей жидкости и среды над ней.

Высота столба  $h$  определяется как сумма высот  $h_1$  и  $h_2$ . Удвоение высоты  $h_1$  либо  $h_2$  недопустимо, так как из-за непостоянства внутреннего сечения стеклянных трубок 1, 2 высоты  $h_1, h_2$  могут различаться. Для исключения влияния капиллярных сил в манометрах используются стеклянные трубки с внутренним диаметром 8—10 мм. Если рабочей жидкостью служит спирт, то внутренний диаметр трубок может быть снижен.

Двухтрубные манометры с водяным заполнением используются для измерения давления, разрежения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в диапазоне до  $\pm 10$  кПа. При заполнении манометра ртутью пределы измерения расширяются до 0,1 МПа, при этом измеряемой средой

могут быть вода, неагрессивные жидкости и газы.

При использовании жидкостных манометров для измерения разности давлений сред, находящихся под статическим давлением до 5 МПа, в конструкции приборов вводятся дополнительные элементы, предназначенные для защиты прибора от одностороннего статического давления и проверки начального положения уровня рабочей жидкости.

Согласно выражению (11.2) источниками погрешностей двухтрубных манометров являются отклонения от расчетных значений местного ускорения свободного падения, плотностей рабочей жидкости и среды над ней, ошибки в считывании высот  $h_1$  и  $h_2$ .

Местное ускорение свободного падения рассчитывается по формуле [1]

$$g = g_n [1 - 0,0026 \cos(2\Delta\varphi) - 2 \cdot 10^{-3} H], \quad (11.3)$$

где  $g_n$  — нормальное ускорение свободного падения, равное  $9,80665 \text{ м/с}^2$ ;  $\Delta\varphi$  — отклонение географической широты от широты  $45^\circ$ , соответствующей нормальному ускорению свободного падения;  $H$  — высота над уровнем моря, м.

Плотности рабочей жидкости и среды даются в таблицах теплофизических свойств веществ в зависимости от температуры и давления. Погрешность считывания разности высот уровней рабочей жидкости зависит от цены деления шкалы. Без дополнительных оптических устройств при цене деления 1 мм погрешность считывания разности уровней составляет  $\pm 2$  мм с учетом погрешности нанесения шкалы. При использовании дополнительных устройств для повышения точности считывания  $h_1, h_2$  необходимо учитывать расхождение температурных коэффициентов расширения шкалы, стекла и рабочего вещества. Разность высот уровней приводят к  $0^\circ\text{C}$  с использованием формулы

$$h_0 = h_t [1 - (\beta - \alpha) t], \quad (11.4)$$

где  $\beta$  — коэффициент видимого расширения рабочего вещества в стекле, у ртути  $\beta = 0,00018 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения материала шкалы, для латуни  $\alpha = 0,000019 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Однотрубные манометры. Для повышения точности отсчета разности

высот уровней используются однострубные (чашечные) манометры (рис. 11.2). У однострубногo манометра одна трубка заменена широким сосудом, в который подается большее из измеряемых давлений. Трубка, прикрепленная к шкальной пластинке, является измерительной и сообщается с атмосферой, при измерении разности давлений к ней подводится меньшее из давлений. Рабочая жидкость заливается в манометр до нулевой отметки.

Под действием давления часть рабочей жидкости из широкого сосуда перетекает в измерительную трубку. По-

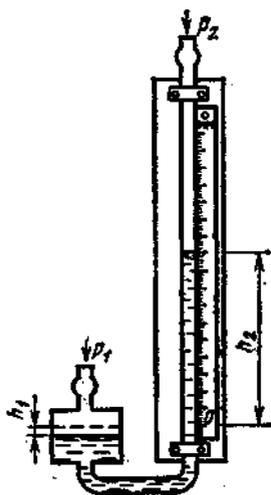


Рис. 11.2. Схема однострубногo манометра

жидкости приводят к снижению погрешности считывания, которая с учетом погрешности градуировки шкалы не превышает  $\pm 1$  мм при цене деления 1 мм.

Другие составляющие погрешности, обусловленные отклонениями от расчетного значения ускорения свободного падения, плотности рабочей жидкости и среды над нею, температурными расширениями элементов прибора, являются общими для всех жидкостных манометров и рассчитываются по методике, рассмотренной выше.

У двухтрубных и однострубногo манометров основной погрешностью является погрешность считывания разности уровней. При одной и той же абсолютной погрешности приведенная погрешность измерения давления снижается при увеличении пределов измере-

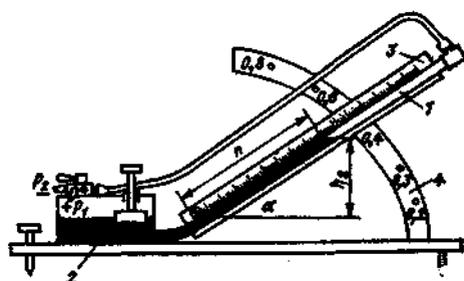


Рис. 11.3. Схема микроманометра ММН

скольку объем жидкости, вытесненной из широкого сосуда, равен объему жидкости, поступившей в измерительную трубку,

$$h_1 F = h_2 f, \quad h_1 = h_2 f / F, \quad (11.5)$$

где  $f$ ,  $F$  — площади поперечного сечения измерительной трубки и широкого сосуда.

При  $f \ll F$   $h_1 \ll h_2$ , и если  $F/f \geq 400$ , то изменением уровня в широком сосуде пренебрегают и при измерении учитывается только изменение уровня в измерительной трубке. Если для повышения точности измерения необходимо учесть это изменение, то шкала градуируется в единицах давления в соответствии с уравнением

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 &= \rho g (h_1 + h_2) = \\ &= \rho g h_2 (1 + f/F). \end{aligned} \quad (11.6)$$

Измерение в однострубногo манометра высоты одного столба рабочей

жидкости. Минимальный диапазон измерения однострубногo манометров с водяным заполнением составляет 1,6 кПа (160 мм вод. ст.), при этом приведенная погрешность измерения не превышает  $\pm 1\%$ . Конструктивное выполнение манометров зависит от статического давления, на которое они рассчитаны.

**Микроманометры.** Для измерения давления и разности давлений до 3 кПа (300 кгс/м<sup>2</sup>) используются микроманометры, которые являются разновидностью однострубногo манометров и снабжены специальными приспособлениями либо для уменьшения цены деления шкалы, либо для повышения точности считывания высоты уровня за счет использования оптических или других устройств. Наиболее распространенными лабораторными микроманометрами являются микроманометры типа ММН с наклонной измерительной трубкой (рис. 11.3). Показания микроманометра определяются по длине

столбика рабочей жидкости  $n$  в измерительной трубке  $1$ , имеющей угол наклона  $\alpha$ . Исходя из равенства объемов рабочей жидкости, вытесненной из широкого сосуда  $2$  в измерительную трубку  $1$ , получаем

$$h_1 F = n f, \quad h_1 = n f / F,$$

где  $h_1$  — изменение уровня в широком сосуде;  $F, f$  — площади поперечного сечения широкого сосуда и трубки.

Поскольку  $h_2 = n \sin \alpha$ ,

$$\begin{aligned} p_1 - p_2 &= g \rho (h_1 + h_2) = \\ &= \rho g n (f/F + \sin \alpha) \end{aligned} \quad (11.7)$$

При определенной плотности рабочей жидкости  $\rho_p$ , в качестве которой обычно используют спирт, и нормальном ускорении свободного падения  $g_n$  все сомножители при  $n$  в выражении (11.7) обозначают одним коэффициентом  $k$ , изменяющимся от 0,2 до 0,8. При изменении плотности спирта вследствие изменения температуры или использовании рабочей жидкости с плотностью  $\rho \neq \rho_p$ , а также при местном ускорении  $g$ , отличном от  $g_n$ , измеряемая разность давлений рассчитывается по показаниям микроманометра  $n$  по следующей формуле:

$$p_1 - p_2 = k n \rho g / (\rho_p g_n).$$

На рис. 11.3 кронштейн  $3$  с измерительной трубкой  $1$  крепится на секторе  $4$  в одном из пяти фиксированных положений, которым соответствуют  $k=0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8$  и пять диапазонов измерения прибора от 0,6 кПа (60 кгс/м<sup>2</sup>) до 2,4 кПа (240 кгс/м<sup>2</sup>). Приведенная погрешность измерения не превышает 0,5%. Минимальная цена деления при  $k=0,2$  составляет 2 Па (0,2 кгс/м<sup>2</sup>), дальнейшее снижение цены деления, связанное с уменьшением угла наклона измерительной трубки, ограничено снижением точности считывания положения уровня рабочей жидкости из-за растягивания мениска.

Более точными приборами являются микроманометры типа ММ, называемые компенсационными. Погрешность считывания высоты уровня в этих приборах не превышает  $\pm 0,05$  мм в результате использования оптической системы для установления начального уровня и микрометрического винта для измерения высоты столба рабочей жидкости, уравнивающего изме-

ряемое давление или разность давлений.

**Барометры.** Барометры применяются для измерения атмосферного давления. Наиболее распространенными являются чашечные барометры с ртутным заполнением, отградуированные в мм рт. ст. (рис. 11.4). Погрешность считывания высоты столба не превышает  $\pm 0,1$  мм, что достигается использованием нониуса  $1$ , совмещаемого с верхней частью мениска ртути. При точном измерении атмосферного давления необходимо вводить рассматриваемые выше поправки на отклонение ускорения свободного падения от нормального [формула (11.3)] и значение температуры барометра, измеряемой термометром  $2$  [формула (11.4)]. При диаметре трубки менее 8—10 мм учитывается капиллярная депрессия, обусловленная поверхностным натяжением ртути.

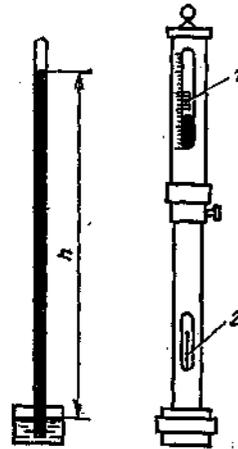


Рис. 11.4. Схема чашечного ртутного барометра

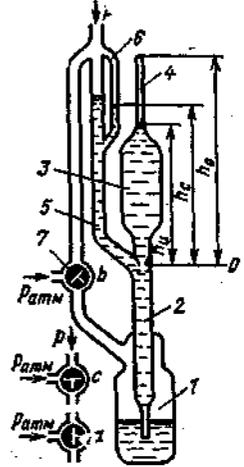


Рис. 11.5. Схема компенсационного манометра

**Компенсационные манометры.** Компенсационные манометры (манометры Мак-Леода), схема которых представлена на рис. 11.5 [10], содержат резервуар  $1$  с ртутью с погруженной в нее трубкой  $2$ . Последняя сообщается с измерительным баллоном  $3$  и трубкой  $5$ . Баллон  $3$  заканчивается глухим измерительным капилляром  $4$ , к трубке  $5$  подключен капилляр сравнения  $6$ . Оба капилляра имеют одинаковые диаметры, чтобы на результатах измерения не сказывалось влияние капиллярных сил. Давление в резервуар  $1$  подается через трехходовой кран  $7$ , который в процессе измерения может находиться в положениях, указанных на схеме.

Принцип действия манометра основан на использовании закона Бойля—Мариотта, согласно которому для фиксированной массы газа произведение объема на давление при неизменной температуре представляет постоянную величину. При измерении давления выполняются следующие операции. При установке крана  $7$  в положение  $a$  измеряемое давление подается в резервуар  $1$ , трубки  $5, 6$  и ртуть сливается в резервуар. Затем кран  $7$  плавно переводится в положение  $c$ . Поскольку атмо-

сферное давление значительно превышает измеряемое  $p$ , ртуть вытесняется в трубку 2. При достижении ртути устья баллона 3, отмеченного на схеме точкой 0, от измеряемой среды отсекается объем газа  $V$ , находящегося в баллоне 3 и измерительном капилляре 4. При дальнейшем повышении уровня ртути отсеченный объем сжимается. При достижении ртути высоты  $h_n$  в измерительном капилляре впуск воздуха в резервуар 1 прекращается и кран 7 устанавливается в положение  $b$ . Изображенное на схеме положение крана 7 и ртути соответствует моменту снятия показаний манометра. Поскольку капилляры 6 и 4 сообщаются, разность уровней в них  $h_c - h_n$  определяется разностью давлений:

$$p_n - p = \rho g (h_c - h_n), \quad (11.8)$$

где  $p_n$ ,  $p$  — соответственно давления в измерительном капилляре 4 и измеряемое.

Давление по закону Бойля—Мариотта определяется выражением

$$p_n = pV / [(h_0 - h_n) f], \quad (11.9)$$

где  $f$  — сечение измерительного капилляра.

Подставляя значение  $p_n$  в выражение (11.8), получаем уравнение измерения компрессионного манометра

$$p = f \rho g \frac{h_0 - h_n}{V - (h_0 - h_n) f} (h_c - h_n). \quad (11.10)$$

В уравнении (11.10) все величины являются постоянными, кроме высоты ртути в капилляре сравнения  $h_c$ , который определяет измеряемое давление  $p$ .

Нижний предел измерения компрессионных манометров составляет  $10^{-3}$  Па ( $10^{-5}$  мм рт. ст.), погрешность не превышает  $\pm 1\%$ . У приборов пять диапазонов измерения. Они охватывают давления до  $10^3$  Па. Чем ниже измеряемое давление, тем больше баллон 1, максимальный объем которого составляет  $1000 \text{ см}^3$ , а минимальный  $20 \text{ см}^3$ ; диаметр капилляров равен соответственно 0,5 и 2,5 мм.

Нижний предел измерения манометра в основном ограничен погрешностью определения объема газа после сжатия, зависящей от точности изготовления капиллярных трубок.

Набор компрессионных манометров совместно с мембранно-емкостным манометром входит в состав государственного специального эталона единицы давления в области  $10^{-3}$ — $10^3$  Па.

**Поплавковые дифманометры.** Принцип уравновешивания измеряемого давления силой тяжести столба рабочей жидкости используется в жидкостных поплавокных дифманометрах, которые являются разновидностью однострунных манометров, но в отличие от рассмотренных выше приборов этого типа не имеют видимого уровня рабочей жидкости. Схема поплавокного дифманометра представлена на рис. 11.6. В широком сосуде 1, куда подается большее из измеряемых давлений, плавает поплавок 2. Его перемещение, определяемое измеряемой разностью давлений, передается показывающей стрелке или записывающему устройству.

Перемещение поплавка  $h_1$  связано с измеряемой разностью давлений следующим соотношением, вытекающим из (11.5):

$$h_2 = h_1 F/f; \quad p_1 - p_2 = \rho g h_1 (1 + F/f), \quad (11.11)$$

где  $h_2$ ,  $f$  — изменение уровня в узком сосуде и его сечение;  $F$  — сечение широкого сосуда.

Ход поплавка  $h_1$  зависит от соотношения площадей сосудов. Узкий сосуд 3 является сменным. Поскольку

$$h_1 = \frac{1}{\rho g} \frac{P_1 - P_2}{1 + F/f},$$

за счет изменения сечения сменного сосуда можно получить один и тот же ход поплавка при различных пределах измерения дифманометра.

Отечественной промышленностью выпускаются показывающие и самопишущие поплавокные дифманометры типа ДП, которые входят в ряд механических крупногабаритных приборов. Производятся семь типоразмеров сменных сосудов, обеспечивающих в соответствии со стандартным рядом (табл. 11.2) измерение разности давлений от 6,3 кПа ( $630 \text{ кгс/м}^2$ ) до 0,1 МПа ( $1 \text{ кгс/см}^2$ ) при статическом давлении до 25 МПа. Предельные погрешности приборов не превышают  $\pm 2\%$  диапазона измерения. Показывающие поплавокные дифманометры

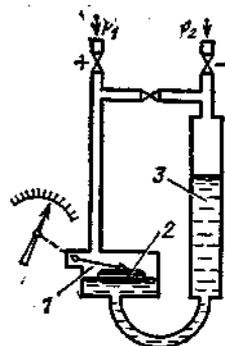


Рис. 11.6. Схема поплавокного дифманометра

могут иметь дополнительные устройства для сигнализации отклонений (ДП-778) и получения унифицированного пневматического сигнала (ДП-787). Дифманометры показывающие и самопишущие, предназначенные для измерения расхода, могут иметь встроенный интегратор для получения показаний суммарного расхода (ДП-781Р, ДП-712Р). Основным недостатком показывающих и самопишущих поплавокных дифманометров является наличие вывода механического перемещения из внутренней полости прибора, часто находящейся под высоким статическим давлением.

Достоинствами рассмотренных выше жидкостных манометров и дифманометров являются их простота и надежность при высокой точности измерений. При работе с жидкостными приборами необходимо исключать возможность перегрузок и резких изменений давления, так как в этом случае может происходить выплескивание рабочей жидкости в линию или атмосферу.

### 11.3. Деформационные манометры и дифманометры

В деформационных манометрах используется зависимость деформации

чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления. Пропорциональная последнему деформация или сила преобразуется в показания или соответствующие изменения выходного сигнала. Большинство деформационных манометров и дифманометров содержат упругие чувствительные элементы, осуществляющие преобразование давления в пропорциональное перемещение рабочей точки.

Наиболее распространенные упругие чувствительные элементы представлены на рис. 11.7, к их числу относятся трубчатые пружины (рис. 11.7, а), сильфоны (рис. 11.7, б), плоские и гофрированные мембраны (рис. 11.7, в, г), мембранные коробки (рис. 11.7, д), выальные мембраны с жестким центром (рис. 11.7, е).

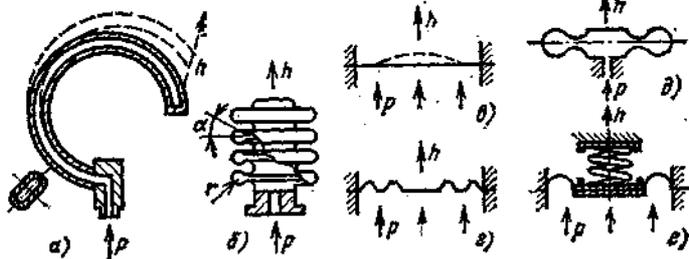


Рис. 11.7. Упругие чувствительные элементы

Статической (упругой) характеристике чувствительного элемента, связывающей перемещение рабочей точки с давлением, присуще наличие начальной зоны пропорциональных перемещений рабочей точки, в которой имеют место упругие деформации, и нелинейной области, в которой возникают пластические деформации. Несовершенство упругих свойств материалов чувствительных элементов обуславливает наличие гистерезиса статической характеристики и упругое последствие. Последнее проявляется в запаздывании перемещения рабочей точки по отношению к приложенному давлению и медленном возвращении ее в начальное положение после снятия давления.

Форма и крутизна статической характеристики зависят от конструкции чувствительного элемента, материала, температуры. Рабочий диапазон выбирается в области упругих деформаций с обеспечением запаса на случай перегрузки чувствительного элемента

давлением. Упругие свойства чувствительных элементов характеризуются коэффициентом жесткости по силе:

$$k_F = F/h = pS_0/h,$$

где  $F$ ,  $S$  — соответственно сила, действующая на упругий чувствительный элемент (перестановочное усилие), и эффективная площадь элемента;  $h$  — перемещение рабочей точки.

Полые одновитковые трубчатые пружины (рис. 11.7, а), имеют эллиптическое или плоскоовальное сечение. Один конец пружины, в который поступает измеряемое давление, закреплен неподвижно в держателе, второй (закрытый) может перемещаться. Под действием разности измеряемого внутреннего давления и внешнего атмосферного трубочатая пружина деформируется: малая ось сечения трубки увеличива-

ется, большая уменьшается, при этом пружина раскручивается и ее свободный конец совершает перемещение в 1—3 мм. Для давлений до 5 МПа трубчатые пружины изготавливают из латуни, бронзы, а для более высоких давлений — из легированных сталей и сплавов никеля.

Сильфонные и мембранные чувствительные элементы имеют более широкие возможности для увеличения эффективной площади с целью получения требуемого перестановочного усилия, что позволяет использовать их для измерения малых избыточных давлений и разрежения. Сильфон (рис. 11.7 б) представляет собой тонкостенную трубку с поперечными кольцевыми гофрами на боковой стенке. Жесткость сильфона зависит от материала, наружного и внутреннего диаметров, толщины стенки заготовки, радиуса закругления гофр  $r$  и угла их уплотнения  $\alpha$ , числа гофр. Сильфоны бывают цельнотянутыми и сварными. Благодаря значительному прогрессу в техноло-

гни изготовления сильфонов они получили широкое распространение в манометрах и дифманометрах ГСП.

Наиболее разнообразными по конструкции являются мембранные чувствительные элементы. Представленная на рис. 11.7, в, плоская или пластинчатая мембрана представляет собой гибкую тонкую пластину, закрепленную по окружности. Под действием разности давлений, действующих с обеих сторон на мембрану, ее центр перемещается. Плоская мембрана имеет нелинейную упругую характеристику и малые перемещения рабочей точки, в связи с чем ее в основном применяют для преобразования давления в силу (пьезоэлектрические преобразователи) или поверхностные деформации (тензопреобразователи).

Для улучшения статической характеристики используют гофрированные мембраны и мембранные коробки (рис. 11.7, г, д). Профили мембран могут быть пильчатыми, трапецеидальными, синусоидальными. Гофрирование мембраны приводит к увеличению ее жесткости, спрямлению статической характеристики и увеличению зоны пропорциональных перемещений рабочей точки. Более широко используются мембранные коробки, которые представляют собой сваренные или спаянные по внешней кромке мембраны. Жесткость коробки вдвое ниже жесткости каждой из мембран. В дифманометрах, чувствительных элементах регуляторов прямого действия используются мембранные блоки, включающие две коробки и более.

В напоромерах и тягомерах применяются вялые мембраны (рис. 11.7, е), изготовленные из бензомаслостойкой прорезиненной ткани. В центре мембраны крепятся металлические пластины, в одну из которых упирается винтовая пружина, выполняющая функцию упругого элемента.

Упругие свойства материалов чувствительных элементов зависят от температуры; так, у трубчатых пружин температурный коэффициент снижения жесткости при росте температуры достигает  $3 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ . Это определяет необходимость защиты приборов от воздействия высоких температур измеряемой среды. С течением времени у упругих чувствительных элементов накапливаются пластические деформации и уменьшаются упругие. Это приводит

к снижению крутизны статической характеристики прибора и ее смещению. Процесс изменения статической характеристики ускоряется при повышенной температуре и пульсации измеряемого давления. Конструкция деформационных манометров и дифманометров обычно предусматривает возможность коррекции отклонений показаний или выходного сигнала, вызванных старением упругого чувствительного элемента.

В соответствии с используемым в приборах типом рассмотренных выше чувствительных элементов деформационные манометры разделяются на трубчато-пружинные, сильфонные и мембранные, разновидности этих групп приборов рассмотрены ниже.

**Трубчато-пружинные манометры.** Большинство показывающих, самопишущих, сигнализирующих манометров и преобразователей давления с трубчатой пружиной являются устройствами прямого преобразования, в которых давление последовательно преобразуется в перемещение чувствительного элемента и связанного с ним механически показывающего, регистрирующего, контактного устройства, элемента пневматического или электрического преобразователя.

Схема показывающего трубчато-пружинного манометра представлена на рис. 11.8. Одновитковая трубчатая пружина 1 с одного конца приварена к держателю 2, прикрепленному к корпусу манометра. Нижняя часть держателя заканчивается шестигранной головкой и штуцером, с помощью которого к манометру подсоединяется трубка, подводящая давление. Свободный конец пружины 1 припаян к пробке 3, которая шарнирно соединяется с поводком 4. При перемещении свободного конца пружины поводок поворачивает зубчатый сектор 5 относительно оси *O*, вызывая поворот шестерни (трибки) 6 и сидящей на одной оси с ней показывающей стрелки 7. Пружина, не показанная на рисунке, обеспечивает поджатие зубцов трибки к зубцам сектора, устраняя люфт. Статическая характеристика манометра может подстраиваться путем изменения точки закрепления поводка 4 в прорези сектора 5. На рис. 11.8 показано радиальное размещение штуцера; выпускаются также манометры с осевым размещением штуцера.

Трубочато-пружинные показывающие манометры выпускаются с верхним пределом измерения от 0,1 МПа (1 кгс/см<sup>2</sup>) до 10<sup>3</sup> МПа (10<sup>4</sup> кгс/см<sup>2</sup>) в соответствии со стандартным рядом. Пружинные вакуумметры имеют диапазон измерения 0,1—0 МПа, а мановакуумметры при нижнем пределе измерения 0,1 МПа имеют верхний предел измерения по избыточному давлению от 0,1 до 2,4 МПа. Образцовые показывающие пружинные манометры имеют класс точности 0,15; 0,25 и 0,4; рабочие 1,5; 2,5; 4, рабочие повышенной точности 0,6 и 1.

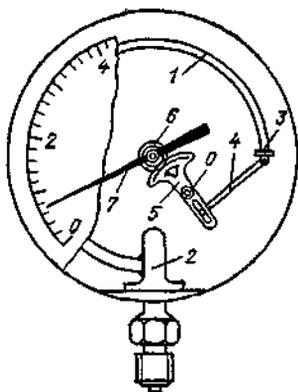


Рис. 11.8. Трубочато-пружинный показывающий манометр

Промышленностью выпускаются механические показывающие и самопишущие манометры с одновитковой (типа МТ) и многовитковой (типа МТМ) трубчатой пружины. Принципиальная схема последнего приведена на рис. 11.9. Под действием измеряемого давления свободный правый конец трубчатой многовитковой пружины 1 перемещается, вызывая поворот оси 2 и сидящего на ней рычага 3. Последний соединен с тягой 4, которая с помощью рычага 5 поворачивает ось 6, на которую насажен П-образный рычаг 7, заканчивающийся пером 8. В показывающих приборах на ось 6 насажен рычаг 9, тягой соединенный с сектором, перемещающим трибку показывающей стрелки. Дисковая диаграмма 10 совершает один оборот за 12 или 24 ч, ее вращение осуществляется электрическим двигателем или часовым механизмом. Класс точности показывающих и самопишущих манометров 1; 1,5, они относятся к числу круп-

ногабаритных приборов, размеры которых определяются диаметром дисковой диаграммы [11].

Как показывающие, так и самопишущие манометры могут содержать дополнительные устройства, осуществляющие замыкание электрической цепи при определенном значении измеряемого давления, преобразование перемещения конца трубчатой пружины в пропорциональный электрический или пневматический сигнал.

Для сигнализации предельных отклонений давления в цепях защиты и позиционного регулирования широко применяются электро-

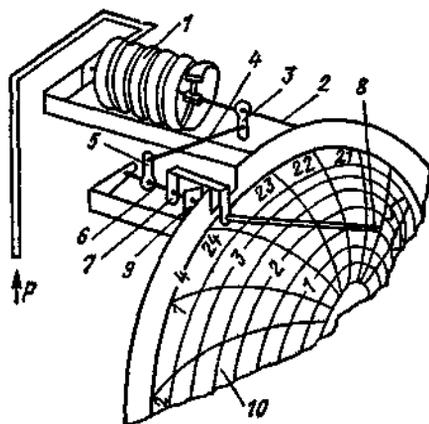


Рис. 11.9. Самопишущий манометр типа МТС

контактные манометры. Схема манометра типа ЭКМ представлена на рис. 11.10. В показывающий манометр дополнительно введены две стрелки 2, 3, к которым упругими токоподводами поджаты электрические контакты 4. Стрелки 2, 3 с помощью торцевого ключа и поводка 5 устанавливаются против значений сигназируемого давления. Показывающая стрелка 1 также снабжена электрическим контактом 6. Если давление находится в пределах рабочего диапазона, то электрические цепи сигнализации разомкнуты. При достижении показывающей стрелкой любой из контактных замыкается электрическая цепь, вызывая срабатывание сигнализации. Электрические контакты остаются замкнутыми при нахождении показывающей стрелки за пределами рабочего диапазона давления, поскольку стрелки 2, 3 ограничивают смещение контактов внутрь рабочего диапазона, а вне его контакты увлекаются показывающей стрелкой 1. Класс манометров и вакуумметров 1,5; пределы измерения соответствуют стандартному ряду.

На рис. 11.11 представлена схема трубочато-пружинного манометра МЭД с дифференциально-трансформаторным преобразователем 1, имеющего на выходе сигнал переменного тока частотой 50 Гц. Принцип действия

этих преобразователей рассмотрен в § 10.2. Выпускаются модификации манометров МЭД с отсчетным устройством, класс точности обеих модификаций 1, верхние пределы измерения — от 0,1 до 160 МПа по стандартному ряду. В настоящее время на базе манометров МЭД начат выпуск манометров МП, имеющих на выходе унифицированный токовый сигнал. Для его получения в прибор введен усилитель, преобразующий изменения взаимной индуктивности в пропорциональ-

пружинного манометра с компенсацией магнитных потоков типа МПЭ представлена на рис. 11.12. Свободный конец манометрической пружины 1 связан с постоянным магнитом 2, который перемещается между двумя магнитопроводами 3. В результате взаимодействия поля постоянного магнита 2 с полями, создаваемыми обмотками возбуждения и обратной связи, на входе усилителя возникает небаланс измерительного моста, преобразуемый в выходной унифициро-

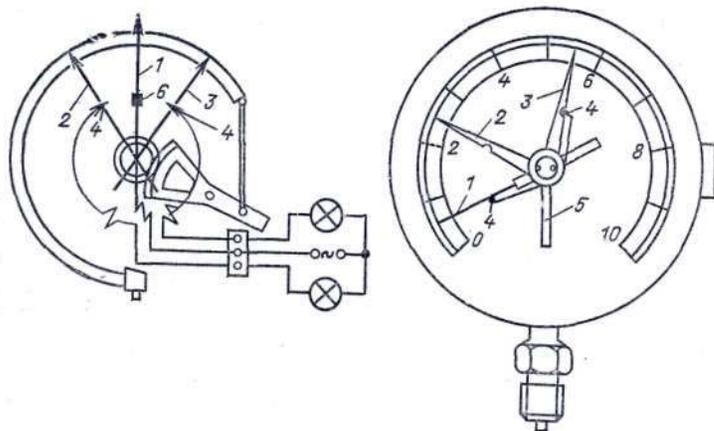


Рис. 11.10. Электроконтактный манометр

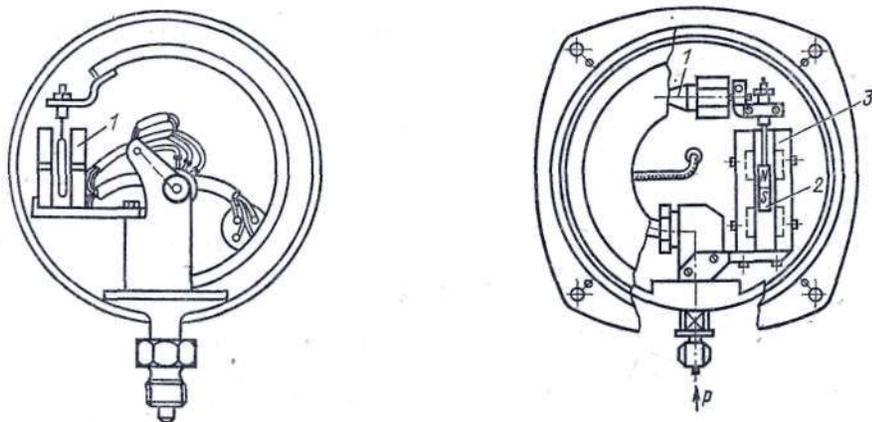


Рис. 11.11. Схема манометра МЭД с дифференциально-трансформаторным преобразователем

Рис. 11.12. Схема пружинного манометра МПЭ

ный токовый сигнал. Предельная приведенная погрешность не превышает 1 %.

В преобразователях давления, имеющих на выходе унифицированный токовый и пневматический сигналы, часто используется принцип статического уравнивания, рассмотренный в § 10.2, 10.3. Схема трубчатого

ваный сигнал. Более подробно магнитная система и измерительная схема приборов рассмотрены в § 10.3.

Поскольку в манометрах МПЭ отрицательная обратная связь используется для компенсации магнитного потока постоянного магнита, упругий чувствительный элемент и магнитный преобразователь не охвачены обратной связью. В связи с этим изменение

характеристик упругого чувствительного элемента и магнитных преобразователей в прямом канале и в цепи обратной связи влияют на коэффициент передачи преобразователей давления.

Манометры МПЭ выпускаются в соответствии со стандартным рядом с верхними пределами измерения от 4 до 60 МПа, на выходе приборы имеют токовый унифицированный сигнал 0—5 мА при сопротивлении нагрузки до 2,5 кОм, класс 1.

Преобразователи давления с силовой компенсацией характеризуются

опорой 5 перемещаются, при этом отклоняется сердечник дифференциально-трансформаторного преобразователя 6, вызывая последовательно изменения сигнала на входе и выходе усилителя УП, а также силы, развиваемой электросиловым механизмом обратной связи. Для снижения жесткости подвижной системы все рычаги крепятся на ленточных опорах. Более подробно принцип действия преобразователей с силовой компенсацией рассмотрен в § 10.5.

Преимуществом преобразователей с силовой компенсацией является то,

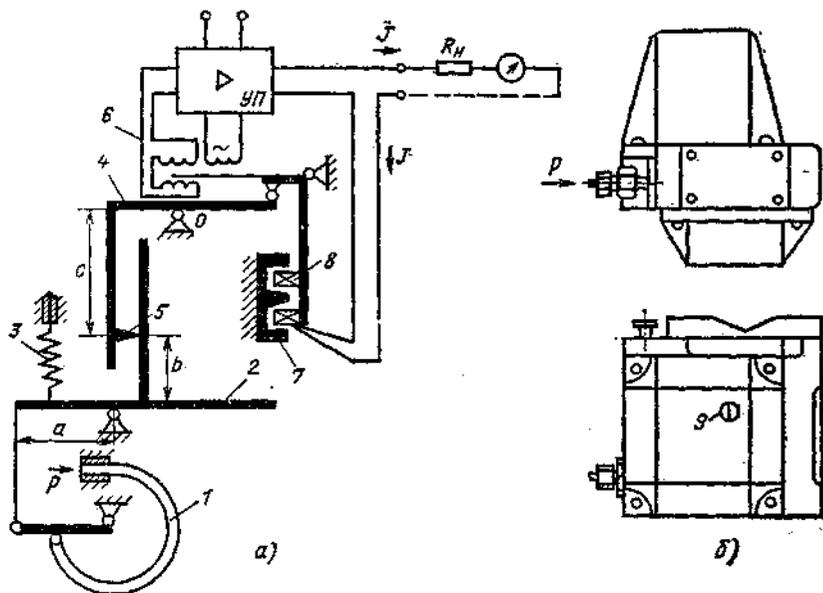


Рис. 11.13. Схема электрического манометра с силовой компенсацией типа МПЭ

увеличением числа элементов, охваченных обратной связью. Схема пружинного манометра с силовой компенсацией типа МП-Э представлена на рис. 11.13, а. Усилие от манометрической пружины 1, приложенное к Т-образному рычагу 2, компенсируется усилием от электросилового механизма обратной связи, включающего постоянный магнит 7 и подвижную катушку 8, обтекаемую выходным током  $I$ . Начальная установка рычажной системы производится пружиной 3, изменение натяжения которой осуществляется через отверстие 9 в крышке прибора (рис. 11.13, б).

При неравенстве моментов, развиваемых манометрической пружиной и электросиловым механизмом обратной связи, рычаги 2, 4 вместе с подвижной

что на коэффициент передачи не влияют характеристики чувствительного элемента и элементов, охваченных обратной связью: дифференциально-трансформаторного преобразователя, усилителя. Это обеспечило возможность создания на рассмотренном принципе действия образцовых преобразователей давления типа ИПД, имеющих класс точности 0,06. Недостатком приборов с силовой компенсацией является их низкая виброустойчивость.

Манометры с силовой компенсацией типа МП-Э выпускаются с верхним пределом измерения от 4 до 100 МПа, выходной сигнал — постоянный ток 0—5 (20) мА, суммарное сопротивление нагрузки не должно превышать 2,5 кОм, класс точности 0,6; 1; 1,5.

С использованием одной и той же элементной базы выпускаются трубчато-пружинные манометры с унифицированным пневматическим выходным сигналом 0,02—0,1 МПа (0,2—1 кгс/см<sup>2</sup>). Отличие этих приборов от рассмотренных выше состоит в использовании индикатора рассогласования типа сопло — заслонка, пневмоусилителя и сиффона обратной связи, преобразующего выходное давление в усилие. Манометры пневматические типа МП-П выпускаются на те же пределы измерения, что и МП-Э, класс точности приборов 0,5; 1, давление питающего воздуха 0,14 МПа, предельная длина линий связи от преобразователя до вторичного прибора составляет 300 м.

рения у приборов МС составляет 0,025—0,4 МПа, класс точности манометров 1; 1,5.

Вакуумметры и мановакуумметры имеют нижний предел измерения 0,1 МПа, верхний: в первом случае 0, а во втором — избыточное давление 0,06—0,3 МПа; класс точности приборов 1,6; 2,5. Напоромеры НС и тягомеры ТМС выпускаются соответственно с верхним и нижним пределом измерения от 0,25 до 25 кПа, а тягонапоромеры ТМНС с пределами измерения от ±0,12 до ±12 кПа, класс приборов 2,5. У сиффонных механических дифманометров в качестве чувствительного элемента используется сиффонный блок, схема которого представлена на рис. 11.14, а, на рис. 11.14, б

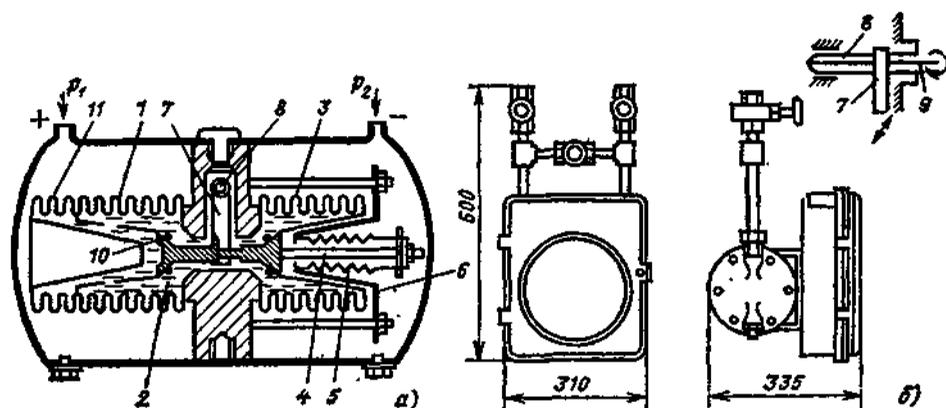


Рис. 11.14. Сиффонный дифманометр типа ДС:

а — схема сиффонного блока; б — внешний вид

**Сиффонные манометры и дифманометры.** Сиффонные чувствительные элементы используются в механических показывающих и самопишущих приборах следующих типов: МСП, МСС (манометры), МВСС (мановакуумметры), ВСП, ВСС (вакуумметры), ДСП, ДСС (дифманометры), НСП, НСС (напоромеры), ТМСП, ТМСС (тягомеры), ТНСП, ТНСС (тягонапоромеры). В этих приборах внутри сиффона находится пружина, определяющая диапазон измерения прибора. Сочленение рабочей точки сиффона с показывающим или регистрирующим устройством выполняется так же, как и у пружинных манометров, схема которых была представлена на рис. 11.9. Сиффонные манометры имеют диапазон измерения более узкий, чем пружинные. Так, верхний предел изме-

дан внешний вид дифманометра.

Под действием разности давлений рабочий сиффон 1, находящийся в плюсовой камере дифманометра, сжимается и кремнийорганическая жидкость 2, заполняющая внутреннюю полость сиффона 1, частично вытесняется во внутреннюю полость сиффона 3, находящегося в минусовой камере дифманометра. При этом перемещается шток 4, жестко соединенный с дном сиффона 3. Работавшие на растяжение пружины 5 одним концом прикреплены к неподвижному стакану 6, а другим — к концу штока 4. Со штоком 4 соединен конец рычага 7, который с помощью торсiona 8, отделяющего внутреннюю полость дифманометра от атмосферы, поворачивает ось 9, связанную с записывающим или показывающим устройством. Резинко-

вые кольца 10 служат для ограничения хода штока 4 при односторонних перегрузках. Первые три гофра 11 представляют собой термокомпенсатор, воспринимающий изменение внутреннего объема жидкости 2 при изменении температуры прибора.

Дифманометры ДС имеют верхний предел измерения от 6,3 кПа до 0,16 МПа при статическом давлении 16 и 32 МПа, класс точности 1; 1,5.

Сильфоны широко используются в качестве чувствительных элементов в преобразователях давления со статическим уравниванием: в приборах с компенсацией магнитных потоков, в электрических и пневматических преобразователях давления с силовой компенсацией.

Сильфонные дифманометры с компенсацией магнитных потоков выпускаются в следующих модификациях: напоромеры ДСЭН с верхним пределом измерения от 1 до 4 кПа, с теми же нижними пределами по разрежению тягомеры ДСЭТ и тягонапоромеры ДСЭТН с диапазоном измерения — 200—200 Па. Класс точности приборов 1; 1,5. Сильфонные дифманометры — расходомеры ДСЭР имеют на выходе токовый сигнал, линейно зависящий от расхода через сужающее устройство. При этом ток (в мА) связан с разностью давлений на входе дифманометра  $\Delta p$  следующим соотношением:

$$I = 5 \sqrt{\Delta p / \Delta p_{\text{макс}}}$$

где  $\Delta p_{\text{макс}}$  — верхний предел измерения дифманометра. Квадратичная зависимость между разностью давлений и выходным током реализуется за счет нелинейной характеристики усилителя, введенного в цепь обратной связи. Сильфонные дифманометры ДСЭР имеют те же пределы измерения, что и напоромеры, статическое давление среды — до 2,5 кПа, класс точности 1,5.

В электрических и пневматических преобразователях давления с силовой компенсацией сильфонные чувствительные элементы являются основными. От пружинных манометров с силовой компенсацией, рассмотренных выше, эти приборы отличаются лишь типом чувствительного элемента и точкой его подсоединения к Т-образному

рычагу (рис. 11.13). Сильфонные электрические и пневматические преобразователи с силовой компенсацией выпускаются в следующих модификациях: напоромеры НС-Э, П с верхними пределами измерения от 0,4 до 40 кПа, тягомеры ТС-Э, П с нижними пределами измерения от —0,4 до —40 кПа, тягонапоромеры ТНС-Э, П с диапазоном измерения от —200 до 200 кПа и от —20 до 20 кПа, манометры МС-Э, П с верхним пределом измерения от 0,04 до 2,5 МПа. С теми же верхними пределами измерения при нижнем —0,1 МПа выпускаются мановакуумметры МВС-Э, П. Класс точности перечисленных модификаций приборов 0,5; 1.

В манометрах абсолютного давления МАС-Э, П, выпускаемых с верхним пределом измерения от 6 кПа до 2,5 МПа, к концам Т-образного рычага подсоединяются два сильфона, один из которых вакуумирован, а в другой подается измеряемое давление. Класс точности МАС зависит от диапазона измерения и находится в пределах от 0,6 до 2,5. В дифманометрах сильфонных ДС-Э, П, выпускаемых с верхним пределом измерения от 4 кПа до 0,63 МПа при статическом давлении до 40 МПа, используются в качестве чувствительных элементов сильфонные блоки, по конструкции близкие к рассмотренным выше и представленным на рис. 11.14. Отличие состоит в том, что в ДС-Э, П сильфоны служат для преобразования разности давлений в силу и винтовая пружина в связи с этим используется лишь для предотвращения сближения клапанов с уплотняющими кольцами. Вывод микронных перемещений штока из полости высокого давления осуществляется через уплотняющую мембрану. Класс точности дифманометров 0,6; 1; 1,5.

**Мембранные манометры и дифманометры.** Мембранные упругие чувствительные элементы, чаще в виде мембранных коробок, используются в приборах для измерения напора и разрежения. Схема профильного напорометра типа НМП и его внешний вид представлены на рис. 11.15. Измеряемое давление через штуцер 1 на задней стенке прибора подается во внутреннюю полость мембранной коробки 2. С помощью системы рычагов и тяг 3, изображенных на схеме упрощенно, перемещение центра мембранной ко-

вые кольца 10 служат для ограничения хода штока 4 при односторонних перегрузках. Первые три гофра 11 представляют собой термокомпенсатор, воспринимающий изменение внутреннего объема жидкости 2 при изменении температуры прибора.

Дифманометры ДС имеют верхний предел измерения от 6,3 кПа до 0,16 МПа при статическом давлении 16 и 32 МПа, класс точности 1; 1,5.

Сильфоны широко используются в качестве чувствительных элементов в преобразователях давления со статическим уравниванием: в приборах с компенсацией магнитных потоков, в электрических и пневматических преобразователях давления с силовой компенсацией.

Сильфонные дифманометры с компенсацией магнитных потоков выпускаются в следующих модификациях: напоромеры ДСЭН с верхним пределом измерения от 1 до 4 кПа, с теми же нижними пределами по разрежению тягомеры ДСЭТ и тягонапоромеры ДСЭТН с диапазоном измерения — 200—200 Па. Класс точности приборов 1; 1,5. Сильфонные дифманометры — расходомеры ДСЭР имеют на выходе токовый сигнал, линейно зависящий от расхода через сужающее устройство. При этом ток (в мА) связан с разностью давлений на входе дифманометра  $\Delta p$  следующим соотношением:

$$I = 5 \sqrt{\Delta p / \Delta p_{\text{макс}}},$$

где  $\Delta p_{\text{макс}}$  — верхний предел измерения дифманометра. Квадратичная зависимость между разностью давлений и выходным током реализуется за счет нелинейной характеристики усилителя, введенного в цепь обратной связи. Сильфонные дифманометры ДСЭР имеют те же пределы измерения, что и напоромеры, статическое давление среды — до 2,5 кПа, класс точности 1,5.

В электрических и пневматических преобразователях давления с силовой компенсацией сильфонные чувствительные элементы являются основными. От пружинных манометров с силовой компенсацией, рассмотренных выше, эти приборы отличаются лишь типом чувствительного элемента и точкой его подсоединения к Т-образному

рычагу (рис. 11.13). Сильфонные электрические и пневматические преобразователи с силовой компенсацией выпускаются в следующих модификациях: напоромеры НС-Э, П с верхними пределами измерения от 0,4 до 40 кПа, тягомеры ТС-Э, П с нижними пределами измерения от —0,4 до —40 кПа, тягонапоромеры ТНС-Э, П с диапазоном измерения от —200 до 200 кПа и от —20 до 20 кПа, манометры МС-Э, П с верхним пределом измерения от 0,04 до 2,5 МПа. С теми же верхними пределами измерения при нижнем —0,1 МПа выпускаются мановакуумметры МВС-Э, П. Класс точности перечисленных модификаций приборов 0,5; 1.

В манометрах абсолютного давления МАС-Э, П, выпускаемых с верхним пределом измерения от 6 кПа до 2,5 МПа, к концам Т-образного рычага подсоединяются два сильфона, один из которых вакуумирован, а в другой подается измеряемое давление. Класс точности МАС зависит от диапазона измерения и находится в пределах от 0,6 до 2,5. В дифманометрах сильфонных ДС-Э, П, выпускаемых с верхним пределом измерения от 4 кПа до 0,63 МПа при статическом давлении до 40 МПа, используются в качестве чувствительных элементов сильфонные блоки, по конструкции близкие к рассмотренным выше и представленным на рис. 11.14. Отличие состоит в том, что в ДС-Э, П сильфоны служат для преобразования разности давлений в силу и винтовая пружина в связи с этим используется лишь для предотвращения сближения клапанов с уплотняющими кольцами. Вывод микронных перемещений штока из полости высокого давления осуществляется через уплотняющую мембрану. Класс точности дифманометров 0,6; 1; 1,5.

**Мембранные манометры и дифманометры.** Мембранные упругие чувствительные элементы, чаще в виде мембранных коробок, используются в приборах для измерения напора и разрежения. Схема профильного напоромера типа НМП и его внешний вид представлены на рис. 11.15. Измеряемое давление через штуцер 1 на задней стенке прибора подается во внутреннюю полость мембранной коробки 2. С помощью системы рычагов и тяг 3, изображенных на схеме упрощенно, перемещение центра мембранной ко-

робки преобразуется в пропорциональный угол поворота оси 4, на которую насажена показывающая стрелка 5, перемещающаяся вдоль профильной шкалы 6. Для настройки начального положения показывающей стрелки используется корректор 7, находящийся на лицевой панели. Эти приборы выпускаются так же, как тягомеры и тягонапоромеры. Диапазон измерения

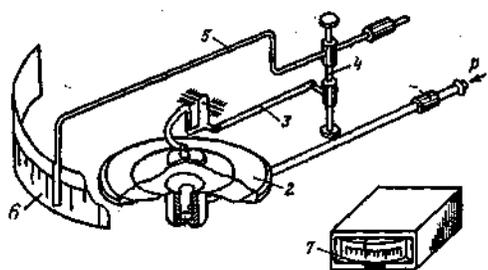


Рис. 11.15. Схема и внешний вид мембранного напоромера НМП

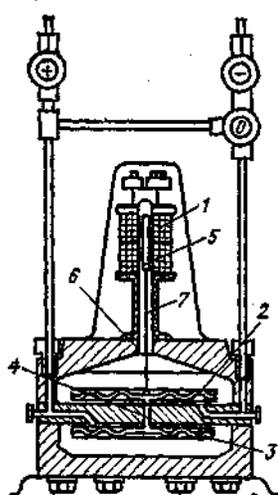


Рис. 11.16. Схема мембранного дифманометра ДМ

приборов достигает 25 кПа в соответствии со стандартным рядом при классе точности 1,5; 2,5.

Мембранные чувствительные элементы применяются в преобразователях давления как с прямым преобразованием измеряемой величины, так и со статическим уравновешиванием. На рис. 11.16 представлена схема дифманометра типа ДМ, имеющего встроенный дифференциально-трансформаторный преобразователь 1. Чувствительным элементом служит мембранный

блок, верхняя мембранная коробка 2 которого находится в минусовой камере, куда поступает меньшее из измеряемых давлений. Нижняя мембранная коробка 3 находится в плюсовой камере дифманометра. Через трубку 4 внутренние полости мембранных коробок 2 и 3, заполненные дистиллятом или кремнийорганической жидкостью, сообщаются.

Под действием разности давлений нижняя мембранная коробка 3 сжимается и часть воды перетекает в мембранную коробку 2, вызывая ее деформацию и перемещение сердечника 5. Последний находится внутри разделительной трубки 6, выполненной, как и стержень 7, из немагнитного материала. Снаружи трубки 6 находится катушка дифференциально-трансформаторного преобразователя 1. Мембраны каждой из коробок имеют одинаковый профиль, благодаря чему при односторонних перегрузках статическим давлением одна из коробок складывается, и чувствительный элемент сохраняет свою упругую характеристику. Нижняя мембранная коробка имеет малую жесткость, и с ее помощью осуществляется компенсация температурных изменений объема жидкости, находящейся внутри мембранного блока. Подробно принцип действия дифференциально-трансформаторного преобразователя и системы дистанционной передачи рассмотрен выше, в § 10.2.

Дифманометры ДМ имеют в соответствии со стандартным рядом верхний предел измерения от 1,6 кПа до 0,63 МПа при статическом давлении 6,3; 25 и 63 МПа, класс точности дифманометров 1; 1,5.

С аналогичным мембранным блоком выпускаются дифманометры ДМЭ и ДМЭР с компенсацией магнитных потоков; принцип действия этих преобразователей рассмотрен в § 10.3. Дифманометры имеют верхний предел измерения 4—25 кПа и 0,04—0,63 МПа в соответствии со стандартным рядом, расчетное статическое давление до 40 МПа, класс точности дифманометров 1. Дифманометры-расходомеры ДМЭР имеют класс точности 1,5, и подобно сифонным дифманометрам ДСЭР их выходной сигнал постоянного тока 0—5 мА связан с измеряемым перепадом давления  $\Delta p$  следующим соотношением:  $I = 5 \sqrt{\Delta p / \Delta p_{\max}}$ , где

$\Delta p_{\text{макс}}$  — верхний предел измерения дифманометра. Формирование указаний нелинейной зависимости осуществляется с помощью нелинейной обратной связи.

Чувствительный элемент в виде мембранной коробки используется в мембранных электрических манометрах ММЭ с компенсацией магнитных потоков и в манометрах абсолютного давления МАДМЭ. Первые имеют верхний предел измерения от 0,16 до 2,5 МПа, вторые 0,01 и 0,06 МПа.

В дифманометрах с силовой компенсацией электрических и пневматических типа ДМ-Э, П; ДМ-ЭР в качестве чувствительных элементов используется вялая мембрана с жестким центром и упругой винтовой пружиной. Принцип действия приборов с силовой компенсацией рассмотрен выше, в § 10.5. Дифманометры могут использоваться в качестве напорометров, тягомеров и тягонапорометров. Диапазон измерения приборов составляет 0,16—6,3 кПа при статическом давлении 0,25 и 1 МПа, класс точности 1; 1,5.

В теплофизических испытаниях манометры с мембранными чувствительными элементами используются для измерения быстрых изменений давления и его пульсаций. При высокой жесткости мембраны и малом диаметре частоты ее собственных колебаний достигают 10—15 кГц и выше, а полоса пропускания манометров 2—4 кГц [12]. Для преобразования перемещений мембраны в электрический сигнал используются индуктивные и емкостные преобразователи. Схема индукционного датчика давления ДД представлена на рис. 11.17. При изменении зазора между мембраной 1 и индуктивным преобразователем 2 по гиперболической зависимости меняется его индуктивное сопротивление, которое измеряется с помощью моста переменного тока. Подключение последнего к датчику осуществляется с помощью разъема 3. Для исключения влияния динамики подводных линий на характеристики манометра датчика ввинчиваются в стенку трубопровода, где производится измерение давления.

Особое место среди приборов давления занимают колокольные дифманометры (рис. 11.18). Рассмотрение этого прибора в разделе деформационных манометров обусловлено использованием в качестве упругого элемента пружины 1, на которой подвешен колокол 2, плавающий в разделительной жидкости 3. Колокол имеет тонкие стенки, к его нижней части прикреплено кольцо 4, в котором сосредоточена основная масса колокола. По этой причине изменение разности высот

разделительной жидкости вне колокола и внутри него практически не влияет на выталкивающую силу, действующую на колокол. При отсутствии разности давлений колокол находится в крайнем нижнем положении, уровни разделительной жидкости вне колокола и под ним совпадают. При подаче большего из измеряемых давлений под

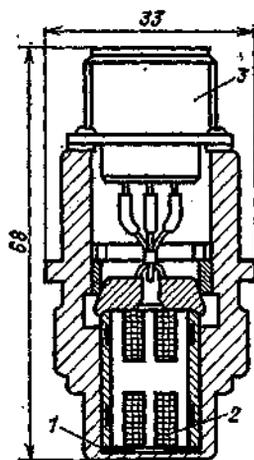


Рис. 11.17. Схема индукционного датчика давления ДД

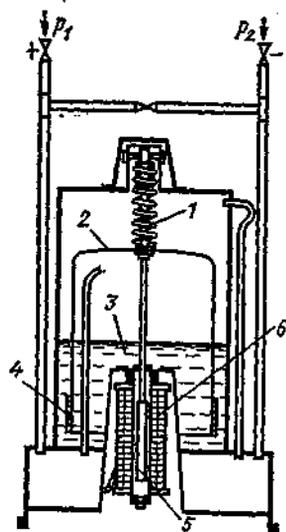


Рис. 11.18. Схема колокольного дифманометра ДК

колокол он всплывает, при этом баланс действующих на колокол сил определяется уравнением

$$G_K - (p_1 - p_2) F_K = kx, \quad (11.12)$$

где  $G_K$ ,  $F_K$  — соответственно сила тяжести колокола и площадь его дна;  $k$ ,

$x$  — жесткость пружины и ее растяжение.

Согласно (11.12) перемещение  $\Delta x$  связанного с дном колокола сердечника 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя 6 линейно зависит от действующей разности давлений:  $\Delta x = F_k(p_1 - p_2)/k$ . Перемеще-

Разнообразие рассмотренных выше конструкций упругих чувствительных элементов в сочетании с возможностью изменения в широких пределах их эффективной площади обеспечивает деформационным манометром наиболее широкий диапазон измеряемых давлений по сравнению с другими ти-

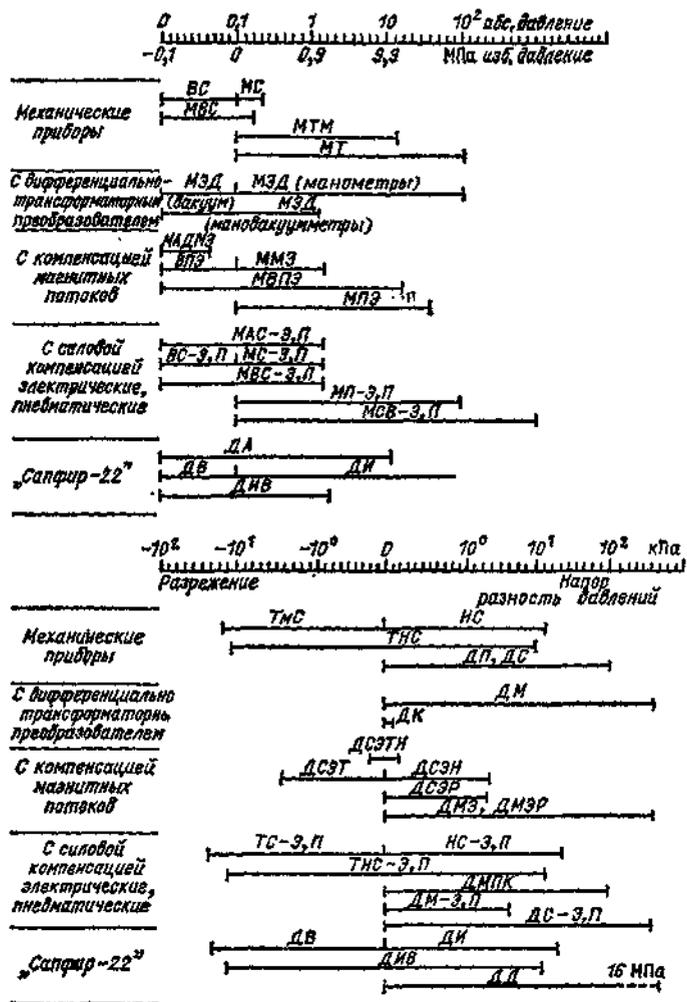


Рис. 11.19. Диапазоны измерения приборов давления основных общепромышленных групп

ние сердечника 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя вызывает изменение на его выходе сигнала переменного тока. Принцип действия дифференциально-трансформаторного преобразователя и системы передачи рассмотрен в § 10.2. Колокольные дифманометры ДК имеют пределы измерения от  $\pm 0,2$  до  $\pm 1$  кПа при классе точности 1,5. В колокольных дифманометрах ДКОФ применяются ферродинамические преобразователи (см. § 10.4).

памя манометров. В связи с этим из пяти упомянутых выше групп общепромышленных приборов четыре относятся к деформационным. Следует отметить, что упругие чувствительные элементы частично используются в преобразователях давления «Сапфир-22», отнесенных к группе электрических манометров. Сводные данные по областям применения групп общепромышленных измерительных приборов и преобразователей давления приведены на рис. 11.19.

#### 11.4. Грузопоршневые манометры

В грузопоршневых манометрах измеряемое давление уравнивается силой тяжести неуплотненного поршня с грузами. Манометры используются в качестве образцовых средств воспроизведения единицы давления в диапазоне от  $10^{-1}$  до  $10^{13}$  Па, а также для точных измерений давления в лабораторной практике.

Схема поршневого манометра, имеющего диапазон измерения 6 МПа (МП-60), представлена на рис. 11.20. Поршень 1 с тарелкой 2 для грузов 3 перемещается внутри цилиндра 4. Поршневая пара подгоняется таким

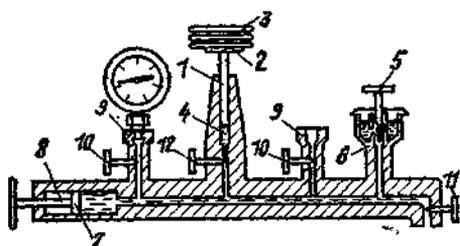


Рис. 11.20. Схема грузопоршневого манометра МП-60

образом, чтобы зазор между поршнем 1 и цилиндром 4 не превышал 0,01 мм. При таком зазоре даже при высоких давлениях скорость опускания поршня из-за утечки рабочей жидкости не превышает 1 мм/мин. Для обеспечения равномерного зазора между цилиндром и поршнем последний в момент измерения вращают по часовой стрелке. В манометрах с диапазоном измерения 0,6 МПа и выше вращение поршня осуществляется вручную. В манометрах с диапазоном измерения 0,06 и 0,25 МПа вращение поршня производится электрическим двигателем.

Внутренняя полость поршневого манометра тщательно заполняется рабочей жидкостью (керосином, касторовым или трансформаторным маслом). Заливка жидкости производится при открытом вентиле 5 через отверстие в дне резервуара 6; поршнем 7 винтового пресса 8 жидкость засасывается внутрь манометра. С помощью пресса 8 в процессе измерения обеспечивается подъем поршня 1 с грузами до высоты, заданной указателем. К стоякам 9 с запорными вентилями 10 подключаются измеряемые манометры. Вентиль

11 служит для слива жидкости из поршневого манометра.

Для получения заданного давления на тарелку 2 с учетом ее массы с поршнем накладываются грузы, создающие определенную силу тяжести. При суммарной массе поршня с грузами  $M$  создаваемое давление

$$p = Mg/S,$$

где  $S$  — эффективная площадь поршня 1, равная сумме площади торца поршня и половины площади зазора;  $g$  — ускорение свободного падения.

Учитывая, что калибровка грузов производится для нормального ускорения свободного падения, при измерениях должны вводиться поправки на местное ускорение свободного падения.

Площадь поршня в рассмотренной конструкции манометров составляет 0,5 и 1 см<sup>2</sup>, что обеспечивает отсутствие прогиба поршня под тяжестью грузов. Класс точности манометров 0,02; 0,05. Давление во внутренней полости грузопоршневых манометров может создаваться винтовым прессом 8 без использования грузопоршневой колонки. В этом случае вентилем 12 колонка отключается, а создаваемое давление измеряется образцовым манометром, подключенным к одному из стояков 9.

Для расширения диапазона давлений, измеряемых грузопоршневыми манометрами, используются поршни дифференциальные, разгруженные, косвенного нагружения с мультипликаторами.

Схема дифференциального разгруженного поршня, используемого в манометрах МВП-2,5,

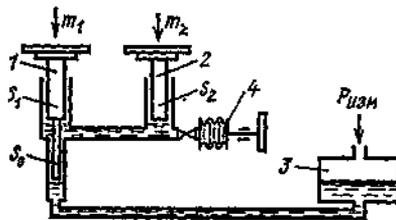


Рис. 11.21. Схема поршневой системы мановакуумметра МВП-2,5

представлена на рис. 11.21. При атмосферном давлении, подаваемом в сосуд 3, поршни 1, 2 взаимно уравновешены и с помощью масляного сифонного пресса 4 установлены в начальном фиксированном положении. При этом

$$M_1 g / (S_1 - S_0) = M_2 g / S_2.$$

где  $M_1, M_2$  — массы соответствующих поршней с тарелками.

При подаче в сосуд 3 избыточного давления поршень 1 поднимается, а поршень 2 опускается. Для восстановления начального положения на поршень 1 накладываются грузы массой  $m_1$  и измеряемое давление рассчитывается как  $p_{\text{изм}} = m_1 g / S_0$ . Если измеряется разряжение  $p_{\text{раз}}$ , то поршень 1 идет вниз, а поршень 2 идет вверх. Для возвращения поршней в исходное положение грузы массой  $m_2$  накладываются на поршень 2, при этом

$$p_{\text{раз}} S_0 = m_2 g (S_1 - S_0) / S_2;$$

$$p_{\text{раз}} = m_2 g (S_1 - S_0) / (S_0 S_2).$$

Низкая погрешность воспроизведения и измерения давления с помощью грузопоршневых манометров определяется в соответствии с (11.12) высокой точностью задания массы грузов, площади сечения поршня и ускорения свободного падения.

### 11.5. Электрические и прочие манометры

**Пьезоэлектрические манометры.** Принцип действия манометров этого типа основан на пьезоэлектрическом эффекте, сущность которого состоит в возникновении электрических зарядов на поверхности сжатой кварцевой пластины, которая вырезается перпендикулярно электрической оси кристаллов кварца. Схема пьезоэлектрического манометра представлена на рис. 11.22. Измеряемое давление с помощью мембраны 1 преобразуется в усилие, сжимающее кварцевые пластины 2. Электрический заряд, возникающий на металлизированных плоскостях 3 под действием усилия  $F$  со стороны мембраны 1, определяется выражением

$$Q = kF = kSp,$$

где  $p$  — давление, действующее на металлическую мембрану 1 с эффективной площадью  $S$ ;  $k$  — пьезоэлектрическая постоянная, Кл/Н.

Напряжение на входе усилителя, подключенного к выходу пьезопреобразователя, определяется общей емкостью измерительной цепи  $C$ :

$$u = Q/C.$$

Кварц в отличие от других сегнетоэлектриков, обладающих пьезоэффектом, является механически прочным и имеет высокую жесткость, что исключает влияние упругой характеристики мембраны 1 на коэффициент передачи пьезоэлектрического преобразователя. Частота собственных колебаний пре-

образователя достигает десятков килогерц, вследствие чего они широко применяются при испытаниях двигателей и на других технологических объектах, характеризующихся высокочастотными изменениями давления.

Пьезоэлектрическая постоянная кварца, составляющая около  $2 \times 10^{-12}$  Кл/Н, отличается стабильностью и слабой зависимостью от температуры, что позволяет использовать пьезопреобразователи для измерения давления высокотемпературных сред. Из-за утечки заряда пьезоэлектрические преобразователи не используются

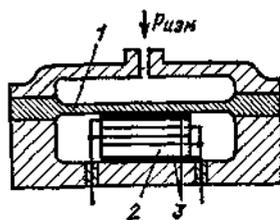


Рис. 11.22. Схема пьезоэлектрического манометра

для измерения статических давлений. С целью повышения чувствительности несколько кварцевых пластин включаются параллельно. Верхний предел измерения давления у этих приборов достигает 100 МПа ( $1000 \text{ кгс/см}^2$ ).

**Манометры с тензопреобразователями.** Манометры с тензорезистивными преобразователями по быстродействию приближаются к пьезоэлектрическим манометрам. Первые представляют собой мембраны, на которых размещены проволочные, фольговые или полупроводниковые резисторы, сопротивление которых меняется при деформации мембраны под действием давления. Сведения о тензопреобразователях были приведены выше, в § 10.6. Проволочные тензорезисторы проще в изготовлении, но их коэффициент тензочувствительности, определяемый отношением относительных изменений сопротивления к деформации, на порядок меньше, чем у полупроводниковых. Отечественной промышленностью выпускаются манометры с полупроводниковыми тензопреобразователями типа «Кристалл».

В настоящее время в СССР начат выпуск приборов давления «Сапфир-22», в которых для преобразования силового воздействия давления в элект-

трический сигнал используется сапфировая мембрана с напыленными кремниевыми резисторами. Схема преобразователя «Сапфир-22» типа ДИ, предназначенного для измерения избыточных давлений с верхним пределом измерения 0,4 МПа и выше, представлена на рис. 11.23. Чувствительным элементом манометра является двухслойная мембрана 1. Измеряемое давление действует на металли-

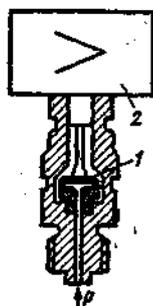


Рис. 11.23. Схема измерительного преобразователя давления ДИ

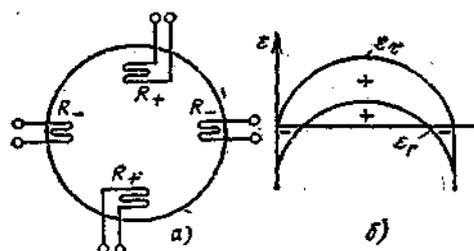


Рис. 11.24. Упрощенная схема размещения полупроводниковых тензорезисторов на поверхности мембраны

ческую мембрану, к которой сверху припаяна сапфировая мембрана с тензорезисторами. Элементы измерительной схемы и усилитель находятся в блоке 2.

Принципиальная схема размещения резисторов на поверхности сапфировой мембраны представлена на рис. 11.24, а. При деформации мембраны в соответствии с эпюрой, приведенной на рис. 11.24, б, касательные напряжения  $\epsilon_t$  имеют постоянный знак, тогда как радиальные  $\epsilon_r$  его меняют. В связи с этим у радиально размещенных тензорезисторов вблизи края мембраны с ростом давления сопротивление снижается, а у касательно размещенных увеличивается. Выбирая точки размещения тензорезисторов, обеспечивают увеличение чувствительности измерительной схемы и возможность введения температурной компенсации.

Преобразователи «Сапфир-22» имеют на выходе токовый сигнал 0—5 мА (0—20, 4—20 мА) при сопротивлении нагрузки до 2,5 кОм (1 кОм), предельная погрешность приборов 0,25; 0,5 %, напряжение питания преобразователей 36 В. Приборы выпускают в нескольких модификациях, предназначенных для измерения избыточного давления (ДИ), вакуума (ДВ), избыточного давления и вакуума (ДИВ), абсолютного давления (ДА), разности давлений (ДД), гидростатического

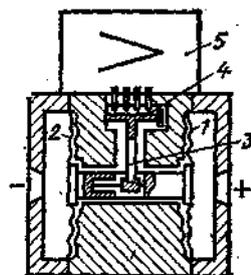


Рис. 11.25. Схема измерительного преобразователя разности давлений ДД

давления (ДГ). Пределы измерения преобразователей в соответствии со стандартными рядами находятся в границах областей, указанных на рис. 11.19.

В преобразователях с диапазоном измерения менее 0,4 МПа (рис. 11.25) используются в качестве чувствительных элементов блоки из двух мембран 1, 2, жестко соединенных между собой и находящихся под воздействием атмосферного и измеряемого давлений (разрежения), либо разности давлений. Жесткость мембранного блока определяется жесткостью мембранно-рычажного тензопреобразователя. Смещение центров мембран приводит к изгибу рычага 3 и сапфировой мембраны с тензорезисторами 4. Усилитель и элементы измерительной схемы находятся в блоке 5.

Основным достоинством преобразователей «Сапфир-22» является использование небольших деформаций чувствительных элементов, что повышает их надежность и стабильность характеристик, а также обеспечивает виброустойчивость преобразователей. При осуществлении тщательной температурной компенсации предельная погрешность приборов может быть снижена до 0,1 %.

Для измерения высоких давлений в диапазоне 250—1600 МПа используются манометры сопротивления манганиновые, в которых чувствительным элементом является катушка из манганиновой проволоки. Сопротивление последней меняется под воздействием измеряемого давления, коэффициент изменения сопротивления составляет  $2,4 \cdot 10^{-11}$  1/Па. Предельная погрешность манометров не превышает 1 %.

**Ионизационные манометры.** Для измерения давления в диапазоне  $10^{-1} - 10^{-8}$  Па ( $10^{-3} - 10^{-10}$  мм рт. ст.),

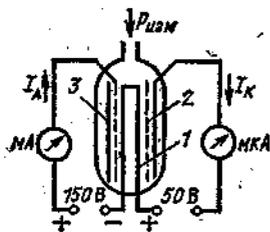


Рис. 11.26. Схема ионизационного манометра

используются ионизационные манометры. Схема прибора представлена на рис. 11.26. Основным элементом манометра является стеклянная манометрическая лампа, содержащая катод 1, который находится внутри анодной сетки 2, окруженной цилиндрическим ионным коллектором 3. Эжектируемые раскаленным катодом электроны ускоряются положительным напряжением, приложенным между анодом и катодом. При движении электроны ионизируют молекулы разреженного газа. Положительные ионы попадают на отрицательно заряженный коллектор 3. При постоянстве анодного напряжения и электронной эмиссии величина коллекторного тока  $I_k$  зависит от измеряемого давления.

Нижний предел измерения ионизационных манометров ограничен фоновым током, вызванным мягким рентгеновским излучением анода и фотоэлектронной эмиссией коллектора. Следует отметить, что образцовые приборы, используемые для измерения малых абсолютных давлений, принято называть манометрами, тогда как промышленные приборы называют вакуумметрами. Последнее название, хотя оно и является общепринятым, нельзя считать правильным.

В магнитных электроразрядных манометрах с холодным катодом для снижения нижнего предела измерения до  $10^{-10}$  Па траектория движения электронов в лампе формируется за счет использования внешнего магнитного поля, при этом удлиняется пробег электронов, растет число их соударений с молекулами газа. К группе магнитных электроразрядных манометров относятся вакуумметры ВМБ-2,3 с манометрическими преобразователями ММ-8, ММ-3М4 и ВМ с манометрическим преобразователем ММ-14М.

**Тепловые манометры.** Для измерения давления в диапазоне  $1 - 10^4$  Па

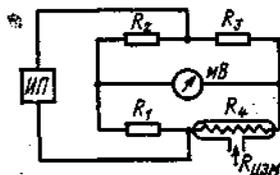


Рис. 11.27. Схема теплового манометра

( $10^{-2} - 10^2$  мм рт. ст.) используются тепловые манометры, которые, как и ионизационные, включают в себя манометрический преобразователь и измерительный блок. Принципиальная измерительная схема теплового манометра приведена на рис. 11.27. Она представляет собой неуравновешенный мост, на который напряжение подается от стабилизированного источника питания ИП. Три плеча моста содержат постоянные резисторы  $R_1 - R_3$ , а четвертое представляет собой нагретую до  $200^\circ\text{C}$  вольфрамовую нить, находящуюся в камере, куда подается измеряемое давление. При указанных давлениях вследствие снижения числа молекул длина их свободного пробега становится соизмеримой с расстояниями между теплопередающими поверхностями измерительных камер прибора, в связи с чем теплопроводность при давлениях  $10^3$  Па (10 мм рт. ст.) и ниже линейно уменьшается по мере снижения давления.

Теплоотдача от вольфрамовой нити зависит как от числа молекул, участвующих в переносе теплоты, так и от температуры стенок камеры. Для снижения влияния на показания прибора колебаний температуры окружающей среды, определяющей температуру стенок камеры, прилежащее к  $R_4$  плечо моста помещается в ваку-

умированную камеру, аналогичную измерительной.

Нижний предел применения манометров ограничивается возрастанием по мере снижения теплопроводности роли лучистого теплообмена, который становится определяющим при давлениях ниже  $10^{-1}$  Па ( $10^{-3}$  мм рт. ст.).

Для измерения температуры нити могут использоваться термопары, в этом случае тепловые манометры называют термопарными. Схема манометрического преобразователя (лам-

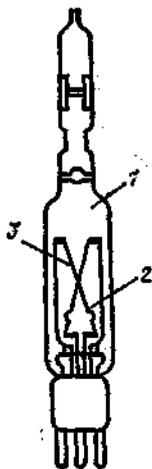


Рис. 11.28. Термопарный манометрический преобразователь

пы) вакуумметра типа ВТ-2 представлена на рис. 11.28. Внутри стеклянного баллона 1, вакуумно плотно подсоединяемого верхней частью к объекту измерения давления, находится платиновый нагреватель 2, температура которого измеряется хромель-копелевой термопарой 3.

Тепловые манометры могут работать в режиме поддержания постоянного тока через нагреватель, тогда измеряемое давление пропорционально разности между температурами нагревателя и стенок лампы. При работе в режиме поддержания постоянной разности температур за счет изменения тока величина последнего характеризует измеряемое давление.

#### 11.6. Методика измерения давления и разности давлений

Погрешность измерения давления зависит от инструментальных погрешностей измерительных приборов, условий эксплуатации манометров, способов отбора давления и его передачи к приборам.

При выборе пределов измерения манометра руководствуются значениями измеряемого давления и характером его изменений. При стабильном измеряемом давлении его значение должно составлять  $3/4$  диапазона измерения прибора, а в случае переменного давления  $2/3$ . Для исключения возможности образования взрывоопасных и горючих смесей манометры, предназначенные для измерения давления таких газов, как кислород, водород, аммиак, окрашивают в соответствии со стандартом в голубой, темно-зеленый, желтый цвета.

Правила установки манометров на промышленных объектах, отбора давления и его передачи к приборам с помощью импульсных линий регламентируются внутриведомственными нормами, которыми руководствуются при монтаже измерительных устройств. Ниже рассмотрены основные положения этих руководящих материалов.

Манометры показывающие и с дистанционной передачей показаний, как правило, устанавливаются вблизи точек отбора давления в месте, удобном для обслуживания. Исключение составляют манометры, используемые для внутриреакторного контроля и контроля давления в устройствах, размещаемых на АЭС в зонах ограниченного доступа. Современные серийные преобразователи давления нельзя размещать внутри активной зоны, поэтому они находятся на значительном расстоянии от точек отбора давления, что приводит к росту инерционности приборов. При этом необходимо учитывать, что наличие столба жидкости в импульсной линии создает систематическую погрешность показаний, которая будет иметь отрицательный или положительный знак в зависимости от того, находится манометр выше или ниже точки отбора давления. Импульсные линии дифманометров имеют большую длину, предельное значение которой составляет 50 м.

Отбор давления осуществляется с помощью труб, подсоединяемых к трубопроводу или внутреннему пространству объекта, где производится измерение давления. В общем случае трубка должна быть выполнена заподлицо с внутренней стенкой, чтобы у выступающей части не создавалось торможение потока. При измерении давле-

ния или разности давлений жидких сред не рекомендуется отбор давления производить из нижних и верхних точек трубопровода, с тем чтобы в импульсные линии не попадали шлам и газы, при газовых средах — из нижних точек трубопровода, чтобы в импульсные линии не попадал конденсат.

При измерении давления в вакуумных системах часто используются манометры, заполненные ртутью. Для исключения попадания токсичных паров ртути в систему на входе манометров устанавливаются ловушки.

Рис. 11.29. Схема ловушки

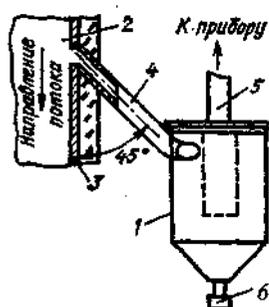
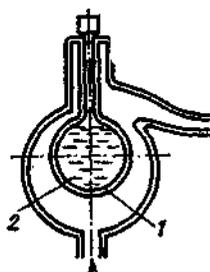


Рис. 11.30. Схема отборного устройства с циклоном

Схема одной из них представлена на рис. 11.29. Пары ртути из манометра конденсируются при соприкосновении с охлажденной поверхностью колбы 1, заполненной жидким азотом 2, и стекают в манометр.

При измерении напоров и разрежений в газоходах, воздуховодах, пылепроводах часто возникает необходимость сглаживания пульсаций давления и отделения взвешенных частиц. На рис. 11.30 показана установка циклона 1 на линии отбора давления в пылепроводе 2, имеющего металлическую стенку 3. Подвод пылевоздушной смеси к циклону осуществляется трубкой 4 тангенциально, отбор давления к прибору из циклона производится из его средней части трубкой 5. В цикло-

не взвешенные частицы сепарируются и периодически удаляются из него через отверстие 6. Для сглаживания пульсаций перед измерительным прибором устанавливается дроссель. Длина линий от точки отбора давления до прибора должна обеспечивать охлаждение измеряемой среды до температуры окружающего воздуха. С помощью кранов переключателей один напорометр или тягомер может подключаться к нескольким точкам отбора давления или разрежения.

Схема установки манометра 1 на трубопроводе представлена на рис.

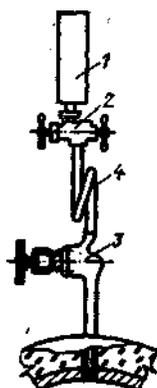


Рис. 11.31. Схема установки манометра на трубопроводе

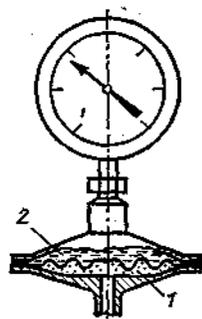


Рис. 11.32. Схема манометра с мембранным разделителем

11.31. Для обеспечения возможности отключения манометра, продувки линии и подключения контрольного манометра используется трехходовой кран 2, при измерении давлений выше 10 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>), а также при контроле давления радиоактивного теплоносителя дополнительный запорный вентиль 3 устанавливается на выходе из трубопровода. При измерении давления сред с температурой выше 70 °С трубка 4 сгибается кольцом, в котором вода охлаждается, а пар конденсируется. На АЭС продувка импульсных линий манометров и дифманометров, работающих с радиоактивными средами, осуществляется в специальную дренажную систему.

При измерении давления агрессивных, вязких и жидкометаллических сред для защиты манометров и дифманометров применяются мембранные и жидкостные разделители. Схема манометра с мембранным разделителем представлена на рис. 11.32. Агрессивная среда подается под мембрану 1,

нижняя часть которой и стенки соответствующей камеры покрыты фторопластом. Пространство над мембраной 2 и внутренняя полость манометрической пружины тщательно заполнены кремнийорганической жидкостью. Для того чтобы в процессе измерения давление над мембраной соответствовало измеряемому, необходимо, чтобы жесткость мембраны была намного меньше жесткости чувствительного элемента. При использовании жидкостных разделителей (рис. 11.33) это ограничение отсутствует. Нейтральная разделительная жидкость, заполняющая часть разделительного сосуда 2, измерительную камеру прибора и линии между ними 3, должна по плот-

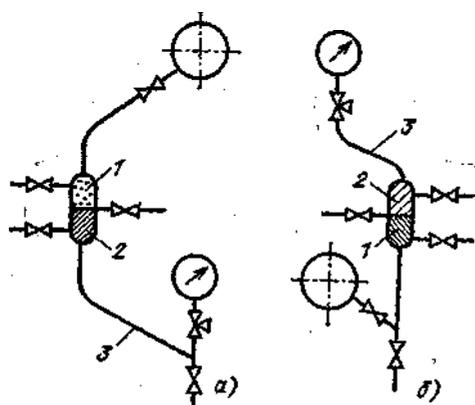


Рис. 11.33. Схема установки манометров с разделительными сосудами

ности значительно отличаться от измеряемой среды 1 и не смешиваться с ней. На рис. 11.33, а плотность агрессивной среды меньше разделительной, а на рис. 11.33, б больше.

При измерении разности давлений подключение дифманометров должно быть произведено таким образом, чтобы среда, заполняющая импульсные линии, не создавала погрешностей из-за разности плотностей или высот столбов жидкостей в них. Линии не должны иметь горизонтальных участков, минимальный угол наклона должен быть не ниже  $5^\circ$ . При измерении разности давлений воды и пара измерительные камеры дифманометров предварительно должны быть заполнены водой. Более подробно правила установки дифманометров рассмотрены в § 12.4.

От правильности показаний манометров зависит не только экономичность работы технологических объектов, но во многих случаях и безопасность, в связи с этим манометры и другие приборы давления подвергаются периодическим поверкам. Для большинства приборов межповерочный период составляет один год. Если приборы работают в условиях повышенной вибрации и температуры, то этот период может быть сокращен. Поверка приборов осуществляется представителями метрологических служб.

Для проведения поверок рабочих приборов давления используются образцовые приборы и устройства, воспроизводящие давление. У грузопоршневых манометров эти функции могут быть совмещены.

При поверке манометров, предназначенных для измерения давления химически активных газов, например кислорода, нельзя использовать грузопоршневые манометры, заполненные маслом.

## Глава двенадцатая

### ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗА И ПАРА ПО ПЕРЕПАДУ ДАВЛЕНИЯ В СУЖАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ

#### 12.1. Общие сведения

При измерениях, связанных с учетом количества вещества, важнейшими исходными понятиями являются *расход* и *количество вещества*.

Расход есть количество вещества, протекающего через сечение трубопровода в единицу времени.

Количество вещества можно измерять либо в единицах массы [кило-

грамм (кг), тонна (т)], либо в единицах объема {кубический метр ( $m^3$ ), литр (л)}. В соответствии с выбранными единицами может производиться измерение либо массового расхода  $Q_m$  (единицы кг/с, кг/ч, т/ч и т. д.), либо объемного расхода  $Q_o$  (единицы  $m^3/с$ , л/с,  $m^3/ч$  и т. д.). Единицы массы дают более полные сведения о количестве или расходе вещества, чем единицы объема, так как объем веще-

ства, особенно газов, зависит от давления и температуры. При измерении объемных расходов газов для получения сопоставимых значений результаты измерения приводят к определенным (так называемым нормальным) условиям. Такими нормальными условиями принято считать температуру  $t_n = 20^\circ\text{C}$ , давление  $p_n = 101\,325\text{ Па}$  (760 мм рт. ст.) и относительную влажность  $\varphi = 0$ . В этом случае объемный расход обозначается  $Q_n$  и выражается в объемных единицах (например,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , но не  $\text{мм}^3/\text{ч}$ ).

В соответствии с ГОСТ-15528 измерительный прибор, служащий для измерения расхода вещества, называется *расходомером*, а прибор для измерения количества вещества — *счетчиком количества* (счетчиком). В каждом конкретном случае к этим терминам следует добавлять наименование контролируемой среды.

Существует большое разнообразие методов измерения расхода и конструктивных разновидностей расходомеров и счетчиков.

Наибольшее распространение получили следующие разновидности расходомеров: 1) переменного перепада давления с сужающими устройствами (относятся к общей группе расходомеров переменного перепада); 2) постоянного перепада давления (относятся к общей группе расходомеров обтекающих); 3) тахометрические; 4) электромагнитные; 5) ультразвуковые.

## 12.2. Основы теории измерения расхода по перепаду давления в сужающих устройствах

Метод измерения расхода по перепаду давления в сужающем устройстве основан на зависимости перепада давления в неподвижном сужающем устройстве, устанавливаемом в трубопроводе, от расхода измеряемой среды. Это устройство следует рассматривать как первичный преобразователь расхода. Создаваемый в сужающем устройстве перепад давления измеряется дифманометром (см. § 11.2), шкала которого градуируется в единицах расхода. При необходимости дистанционной передачи показаний дифманометр должен быть снабжен преобразователем, который линией связи соединяется со вторичным прибором, градуированным в единицах расхода.

Рассматриваемый принцип измерения заключается в том, что при протекании потока через отверстие сужающего устройства повышается скорость потока по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии и соответственно статического давления. Расход может быть определен по перепаду давления  $\Delta p$ , измеренному дифманометром в соответствии с градуировочной характеристикой  $\Delta p = f(Q)$ . Использование рассматриваемого метода измерения требует выполнения определенных условий: характер движения потока до и после сужающего устройства должен быть турбулентным и стационарным; поток должен полностью заполнять все сечение трубопровода; фазовое состояние потока не должно изменяться при его течении через сужающее устройство; во внутренней полости трубопровода до и после сужающего устройства не образуются осадки и другие виды загрязнений; на поверхностях сужающего устройства не образуются отложения, изменяющие его геометрию; пар является перегретым, при этом для него справедливы все положения, касающиеся измерения расхода газа.

Сужающие устройства условно подразделяются на стандартные и нестандартные. Стандартными называются сужающие устройства, которые изготовлены и установлены в соответствии с руководящим нормативным документом РД-50-213-80 [144]. Градуировочная характеристика стандартных сужающих устройств  $\Delta p = f(Q)$  может быть определена расчетным путем без индивидуальной градуировки. Градуировочные характеристики нестандартных сужающих устройств определяются в результате индивидуальной градуировки.

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара используются диафрагмы, сопла и значительно реже сопла Вентури. Диафрагма (рис. 12.1, а) представляет собой тонкий диск с круглым отверстием, ось которого располагается по оси трубы. Передняя (входная) часть отверстия имеет цилиндрическую форму, а затем переходит в коническое расширение. Передняя кромка отверстия должна быть прямоугольной

(острой) без закруглений и заусениц. Стандартные диафрагмы устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм.

Сопло (рис. 12.1, б) имеет спрофилированную входную часть, которая затем переходит в цилиндрический участок диаметром  $d$  (его значение входит в уравнения расхода). Торцевая часть сопла имеет цилиндрическую выточку диаметром, большим  $d$ , для предохранения выходной кромки цилиндрической части сопла от повреждения.

символами  $p_1$  и  $p_2$  отмечены точки отбора давлений на дифманометр. Рассмотрим движения потока через сужающее устройство на примере диафрагмы. На рис. 12.2 показаны профиль потока, проходящего через диафрагму, а также распределение давления вдоль стенки трубы (сплошная линия) и по оси трубы (штрихпунктирная линия). После сечения  $A$  струя сужается и, следовательно, средняя скорость потока возрастает. Вследствие инерции струя продолжает сужаться и на некотором расстоянии после диафраг-

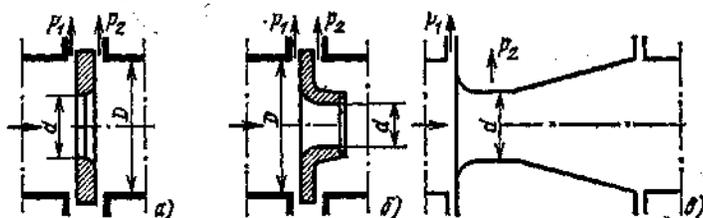


Рис. 12.1. Стандартные сужающие устройства:  
а — диафрагма; б — сопло; в — сопло Вентури

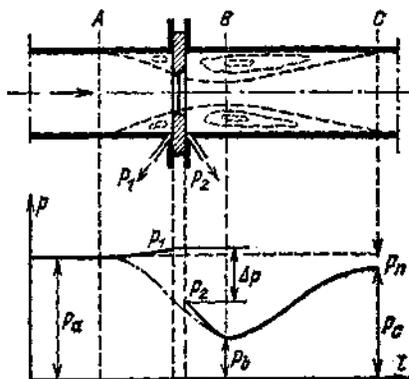


Рис. 12.2. Характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе диафрагмы

При измерении расхода газа стандартные сопла устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм и при измерении расхода жидкостей на трубопроводах диаметром не менее 30 мм.

Сопло Вентури (контур показан на рис. 12.1, в) имеет входную часть с профилем сопла, переходящую в цилиндрическую часть, и выходной конус (может быть длинным или укороченным). Минимальный диаметр трубопровода для стандартных сопел Вентури составляет 65 мм. На рис. 12.1

мы, место наибольшего сужения находится в сечении  $B$ . Увеличение скорости на участке  $AB$  сопровождается уменьшением статического давления от первоначального значения  $p_a$  до минимального значения  $p_b$ .

После сечения  $B$  начинается расширение струи, которое заканчивается в сечении  $C$ . Этот процесс сопровождается уменьшением скорости и увеличением статического давления. В сечении  $C$  скорость примет первоначальное значение (как в сечении  $A$ ), но давление  $p_c$  будет меньше первоначального на  $p_n$ , называемое потерей давления в сужающем устройстве. Наличие потери давления вызвано потерей энергии потока в мертвых зонах, находящихся за диафрагмой, из-за сильного вихреобразования в них. Для определения общей зависимости между расходом и перепадом давления предположим вначале, что жидкость несжимаема (т. е. плотность жидкости не изменяется при прохождении через сужающее устройство), отсутствует теплообмен с окружающей средой и трубопровод горизонтален.

В этом случае закон сохранения энергии для сечений  $A$  и  $B$  может быть записан в виде уравнения Бернулли

$$\frac{p_a}{\rho} + k_a \frac{v_a^2}{2} = \frac{p_b}{\rho} + k_b \frac{v_b^2}{2} + \xi \frac{v_b^2}{2}, \quad (12.1)$$

где  $k_a$  и  $k_b$  — поправочные коэффициенты на неравномерность распределения скоростей в сечениях  $A$  и  $B$ ;  $v_a$ ,  $v_b$  — средние скорости потока в сечениях  $A$  и  $B$ ;  $\xi$  — коэффициент сопротивления на участке  $AB$ , отнесенный в скорости  $v_b$ .

Для неразрывной струи несжимаемой жидкости плотностью  $\rho$ , движущейся по трубе сечением  $F$  со скоростью  $v$ , массовый расход можно выразить формулой  $Q_M = \rho v F$ . Из этого уравнения неразрывности легко получить соотношение

$$F_a v_a = F_b v_b, \quad (12.2)$$

где  $F_a$  и  $F_b$  — площади струи в сечениях  $A$  и  $B$ .

Отношение площади отверстия сужающего устройства  $F_o$  к площади трубопровода  $F$  называется относительной площадью (модулем) сужающего устройства  $m = F_o/F = (d/D)^2$ , где  $d$  и  $D$  — диаметры отверстия сужающего устройства и трубы.

Отношение  $\mu = F_b/F_o$  называется коэффициентом сужения струи.

Учитывая сказанное выше, можно получить другую запись выражения (12.2):

$$v_a = \mu m v_b.$$

Подставляя это значение  $v_a$  в уравнение (12.1), получаем

$$v_b = \frac{1}{\sqrt{\xi + k_b - k_a \mu^2 m^2}} \times \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_a - p_b)}.$$

В расходомерах, применяемых в СССР, обычно измеряется перепад давления не в сечениях  $A$  и  $B$  (т. е. не  $p_a - p_b$ ), а непосредственно до и после сужающего устройства (перепад  $\Delta p = p_1 - p_2$  на рис. 12.2). Эти перепады различаются по значению. Отношение этих перепадов  $\psi = (p_a - p_b) / (p_1 - p_2)$ , тогда

$$v_b = \sqrt{\frac{\psi}{\xi + k_b - k_a \mu^2 m^2}} \times \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}.$$

Учитывая, что  $Q_M = \rho v_b F_b = \rho v_b \mu F_o$ , окончательно получим выражение для массового расхода

$$Q_M = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_b - k_a \mu^2 m^2}} F_o \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)} = \alpha F_o \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)}. \quad (12.3)$$

Величина  $\alpha$  называется коэффициентом расхода, который определяется формулой

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_b - k_a \mu^2 m^2}}.$$

Для объемного расхода выражение имеет вид

$$Q_o = \frac{Q_M}{\rho} = \alpha F_o \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}. \quad (12.4)$$

Формулы (12.3) и (12.4) справедливы для несжимаемых жидкостей. При измерении расхода газа или пара плотность  $\rho$  среды изменяется при прохождении через сужающее устройство вследствие изменения давления. Это учитывается введением в уравнения расхода поправочного множителя на расширение измеряемой среды  $\epsilon$ . Тогда уравнения для массового  $Q_M$  и объемного  $Q_o$  расхода принимают вид

$$Q_M = \alpha \epsilon F_o \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)}, \quad (12.5)$$

$$Q_o = \alpha \epsilon F_o \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}, \quad (12.6)$$

где  $\rho$  — плотность среды в сечении  $A$  (т. е. в невозмущенном потоке до сужающего устройства).

Выражения (12.5) и (12.6) являются основными уравнениями расхода для расходомеров с сужающими устройствами. Они пригодны для сжимаемых и несжимаемых сред, причем для последних  $\epsilon = 1$ . Использование этих формул предполагает, что значения  $\rho$ ,  $F_o$ ,  $\alpha$  и  $\epsilon$  не должны зависеть от расхода. Тогда они могут быть записаны в виде

$$Q_M = k_M \sqrt{\Delta p}, \quad Q_o = k_o \sqrt{\Delta p}, \quad (12.7)$$

где  $k_M$  и  $k_o$  — постоянные коэффициенты. Однако существующие конструкции сужающих устройств обеспечивают практическое постоянство значений коэффициента расхода  $\alpha$  только в определенном ограниченном интервале изменения расхода (точнее, в определенном интервале изменения чисел Рейнольдса  $Re$ ). На рис. 12.3 представ-

лены графики зависимостей  $\alpha = f(\text{Re})$  для диафрагм. Коэффициент расхода  $\alpha$  слабо зависит от  $\text{Re}$  при  $\text{Re} > \text{Re}_{\text{мин}}$ ; поэтому сужающие устройства для измерения расхода могут использоваться только при этих значениях чисел  $\text{Re}$  (следует отметить, что в реальных условиях  $\alpha$  несколько уменьшается с ростом  $\text{Re}$ , что учитывается при расчете по [14]). Поправочный множитель  $\varepsilon$  зависит (для конкретной среды) от от-

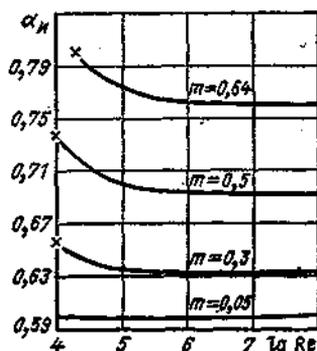


Рис. 12.3. Зависимость  $\alpha = f(\text{Re})$  при различных значениях  $m$  для диафрагм с угловым способом отбора

ношения  $\Delta p/\rho_1$ , а так как с изменением расхода изменяется и  $\Delta p$ , то  $\varepsilon$  также будет изменяться с изменением расхода.

При градуировке расходомера обычно принимается  $\varepsilon = \varepsilon_{\text{ср}}$ , соответствующее наиболее вероятному расходу  $Q_{\text{ср}}$ , называемому средним расходом ( $Q_{\text{ср}}$  не соответствует середине шкалы вторичного прибора). Обычно этот расход характеризует номинальный режим работы установки. Например, паромер для котла производительностью 240 т/ч может иметь верхний предел измерения  $Q_{\text{в.п.}} = 250$  т/ч, но для этого случая  $Q_{\text{ср}} = 240$  т/ч. При  $\Delta p/\rho_1 \rightarrow 0$   $\varepsilon \rightarrow 1$ . Поэтому при измерении расхода сред высокого давления, например свежего пара на электростанциях, поправочный множитель на расширение, как правило, близок к единице.

Между расходом и перепадом давления в сужающем устройстве существует определенная квадратичная зависимость, что позволяет дифманометры, измеряющие перепад давления  $\Delta p = p_1 - p_2$ , градуировать в единицах расхода. Такие дифманометры называются дифманометрами-расходомерами. Для получения равномерной шкалы расходомера в кинематическую

или электронную схему дифманометров или вторичных приборов включаются различные типы устройств, извлекающих квадратный корень. Наличие таких устройств является одним из недостатков метода измерения расхода по перепаду давления.

Другим серьезным недостатком метода является суженный диапазон измерения каждого конкретного расходомера, охватывающий обычно интервал 30—100 % максимального измеряемого расхода  $Q_{\text{в.п.}}$ . Это означает, что использовать конкретный расходомер для измерения расходов в интервале 0—30 % его шкалы не рекомендуется, так как здесь не гарантируется достаточная точность измерения. Это вызвано тем, что в начале шкалы резко увеличивается относительная погрешность измерения перепада давления  $\Delta p$ . Действительно, при уменьшении расхода от  $Q_{\text{в.п.}}$ , например, до  $0,25 Q_{\text{в.п.}}$  в соответствии с (12.7) перепад давления в сужающем устройстве уменьшится в 16 раз, а при расходе  $0,1 Q_{\text{в.п.}}$  — в 100 раз, при этом относительная погрешность измерения перепада также увеличивается соответственно в 16 и 100 раз. Точность расходомера обычно гарантируется только в пределах шкалы 30—100 %.

В эксплуатационных условиях возможно изменение  $\rho$ , влияющее на коэффициенты  $k_m$  и  $k_o$  (12.7) и градуировочную характеристику. Существенное изменение плотности среды обычно наблюдается при изменении температуры и давления газа. Если изменение плотности среды сопровождается изменением  $\varepsilon$  (что будет иметь место, например, при изменении плотности за счет изменения давления газа), то в этом случае показания массового расходомера надо умножить на множитель

$$c_m = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{гр}}} \sqrt{\rho/\rho_{\text{гр}}}$$

а объемного — на множитель

$$c_o = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{гр}}} \sqrt{\rho_{\text{гр}}/\rho}$$

где  $\rho$  и  $\rho_{\text{гр}}$ ,  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_{\text{гр}}$  — действительные и градуировочные значения плотности и  $\varepsilon$ .

Обычно пренебрегают изменением  $\varepsilon$ , и в этом случае

$$c_m = \sqrt{\rho/\rho_{\text{гр}}}, \quad c_o = \sqrt{\rho_{\text{гр}}/\rho}$$

Насколько существенно влияние изменения плотности на результаты измерения, можно понять из следующего примера. Предположим, что сужающее устройство рассчитано на измерение расхода природного газа среднего состава при температуре 20°C. Действительная температура газа при неизменном давлении составляет 5°C. Это вызывает такое изменение плотности, что поправочный множитель

$$c_0 = \sqrt{\rho_{гр}/\rho} = \sqrt{T/T_{гр}} = \sqrt{278/293} = 0,974,$$

т. е. изменение температуры с 20 до 5°C может вызвать погрешность измерения расхода природного газа на 2,6%. При значительных и частых колебаниях плотности обычно применяются расходомеры с автоматическим введением поправки на плотность.

### 12.3. Расчет градуировочной характеристики сужающих устройств

Для практического использования уравнения расхода (12.5) и (12.6) обычно представляются в другой записи:

$$Q_m = 0,01252 \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\rho \Delta p} = 0,01252 \alpha \epsilon m D^2 \sqrt{\rho \Delta p}; \quad (12.8)$$

$$Q_0 = 0,01252 \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\Delta p / \rho} = 0,01252 \alpha \epsilon m D^2 \sqrt{\Delta p / \rho}. \quad (12.9)$$

Входящие в эти выражения величины должны иметь следующие размерности:  $d$ , мм;  $\Delta p$ , кгс/м<sup>2</sup>;  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;  $Q_m$  кг/ч;  $Q_0$ , м<sup>3</sup>/ч.

Для определения объемного расхода  $Q_n$  газа в нормальном состоянии по измеренному объемному расходу  $Q_0$  газа в рабочих условиях при  $t$  и  $p$  следует использовать формулу  $Q_n = Q_0 [\rho T_n / (T p_n k)]$ .

Расчет градуировочной характеристики сужающего устройства предполагает вычисление численного значения  $\alpha$ ,  $\epsilon$ ,  $d$ ,  $\rho$ , уравнений расхода (12.8) и (12.9) в рабочих условиях при известном диаметре проходного отверстия сужающего устройства  $d_{20}$  и трубы  $D_{20}$  в нормальных условиях (т. е. известном  $m$ ). После установления количественного соотношения между  $Q$  и  $\Delta p$  по измеренному в реальных условиях с помощью какого-либо дифманометра перепаду давлений на дан-

ном сужающем устройстве может быть вычислен расход через него.

**Коэффициент расхода.** В соответствии с теорией подобия коэффициенты расхода двух сужающих устройств будут равными при условии их геометрического подобия и гидродинамического подобия потоков, в них протекающих.

Геометрическое подобие сужающих устройств имеет место при подобии их геометрических форм и равенстве модулей  $m$ . Два потока подобны, если равны их числа Рейнольдса  $Re$  и одинаковы профили скоростей. Отсюда следует, что коэффициент расхода  $\alpha$  для данного типа сужающего устройства является функцией  $m$  и числа  $Re$ . Уже указывалось, что при значениях  $Re$ , больших некоторого значения  $Re_{мин}$  (рис. 12.3), коэффициенты расхода у диафрагм и сопел не зависят от свойств измеряемой среды, слабо зависят от значения числа  $Re$  и в основном определяются значением  $m$ . На гидродинамику потока влияет шероховатость трубопровода, причем степень этого влияния определяется диаметром трубы. Кроме того, для реальных диафрагм входные кромки не являются идеально прямоугольными (существует притупление входной кромки), что делает невозможным идеальное геометрическое подобие двух диафрагм с одинаковым  $m$ . Поэтому в теории расходомеров вводится понятие «исходный коэффициент расхода  $\alpha_n$ » — коэффициент расхода сужающего устройства идеальной формы (если это диафрагма, то с идеально прямоугольной входной кромкой), установленного в гладком трубопроводе в предположении  $Re > Re_{мин}$ . Таким образом, исходный коэффициент расхода  $\alpha_n$  не зависит от шероховатости трубопровода и степени притупления входной кромки диафрагмы, а зависит от  $m$  и  $Re$ , причем  $\alpha_n$  растет с увеличением  $m$  и уменьшением  $Re$  (для диафрагм при больших  $m$  с изменением  $Re$  от  $Re_{мин}$  до  $10^8$  уменьшение  $\alpha_n$  может достигать до 8%).

Значения  $\alpha_n$  в зависимости от  $m$  и  $Re$  приводятся в нормативных документах (например, в «Правилах измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами» [14]).

Коэффициент расхода  $\alpha$ , входящий в уравнения (12.8) и (12.9), называется

ся расчетным. Он характеризует реальные условия работы сужающего устройства: наличие шероховатости трубы и притупления входной кромки (для диафрагм). Значение  $\alpha$  можно рассчитать по  $\alpha_n$  с использованием поправочных множителей на шероховатость трубопровода и притупления входной кромки диафрагмы.

Реально существующая шероховатость трубопровода заостряет профиль скоростей и несколько увеличивает коэффициент расхода, особенно при малых диаметрах труб. Это учитывается умножением исходного коэффициента расхода на поправочный множитель  $k_{ш}$ . Для всех типов сужающих устройств значение  $k_{ш}$  увеличивается с уменьшением диаметра трубопровода и увеличением  $m$ . Трубы диаметром  $D \geq 300$  мм имеют малую относительную шероховатость (т. е. по свойствам приближаются к гладким), поэтому для них  $k_{ш} = 1$ . Следует отметить, что если трубопроводы имеют грубые неровности или наросты на внутренней поверхности, то в этом случае достаточно точное измерение расхода среды невозможно.

Изменение  $\alpha$ , вызванное притуплением входной кромки диафрагмы, учитывается введением поправочного множителя  $k_n$  на притупление входной кромки, значение которого зависит от диаметра трубопровода и относительной площади диафрагмы. Значение  $k_n$  уменьшается с увеличением диаметра трубопровода и  $m$ .

Таким образом, расчетный коэффициент расхода  $\alpha$  через исходный коэффициент расхода  $\alpha_n$  при  $Re > Re_{мин}$  будет определяться по формулам:

для диафрагм

$$\alpha = \alpha_n k_{ш} k_n;$$

для сопл

$$\alpha = \alpha_n k_{ш}.$$

При расчете градуировочной характеристики  $\Delta p = f(Q)$  целесообразно задаваться значениями  $Q$ , по которым следует определять  $\alpha$  (при известном значении  $m$ ). При этом коэффициенты  $k_m$  и  $k_o$  в (12.7) окажутся зависящими от расхода, т. е. шкала расходомера будет неравномерной. Если не требуется высокая точность измерения, то можно вычислить  $\alpha$  при среднем расходе  $Q_{ср}$ , в дальнейшем полагая его постоянным при любом расходе. Значение  $\alpha$  можно подсчитывать только

для тех расходов, при которых  $Re > Re_{мин}$  (для диафрагм при  $0,05 \leq m \leq 0,20$   $Re_{мин} = 5 \cdot 10^3$ ; при  $0,20 < m \leq 0,59$   $Re_{мин} = 10^4$ ; для сопл при  $0,05 \leq m < 0,20$   $Re_{мин} = 7 \cdot 10^4$ ; при  $0,20 \leq m < 0,60$   $Re_{мин} = 2 \cdot 10^4$ ).

Практически удобнее определять число  $Re$  не по скорости, а по расходу измеряемого вещества:

$$Re = 0,354 \frac{Q_o}{Dv} = 0,0361 \frac{Q_o \rho}{D\mu}; \quad (12.10)$$

$$Re = 0,354 \frac{Q_m}{D\rho v} = 0,0361 \frac{Q_m}{D\mu}$$

где  $Q_o$  — объемный расход,  $m^3/ч$ ;  $Q_m$  — массовый расход,  $кг/ч$ ;  $\rho$  — плотность среды,  $кг/м^3$ ;  $D$  — внутренний диаметр трубопровода,  $мм$ ;  $\mu$  — динамическая вязкость среды,  $кгс \times с/м^2$ ;  $\nu$  — кинематическая вязкость среды,  $м^2/с$ .

Поправочный множитель  $\epsilon$  на расширение измеряемой среды вводится в уравнение расхода вследствие изменения плотности газа при прохождении через сужающее устройство. В общем случае  $\epsilon$  зависит от отношений  $\Delta p/p$  ( $p$  — абсолютное давление среды до сужающего устройства), модуля  $m$  и типа сужающего устройства и показателя адиабаты  $\kappa$  среды:  $\epsilon = f(\Delta p/p, m, \kappa)$ . При одинаковых  $\Delta p/p$  для диафрагм  $\epsilon$  всегда больше, чем для сопл, вследствие радиального расширения струи, приводящего к увеличению площади ее суженной части. Степень изменения плотности в основном определяется отношением  $\Delta p/p$ , причем при увеличении этого отношения  $\epsilon$  уменьшается. При малых  $\Delta p/p$  значение  $\epsilon$  близко к единице. В большинстве случаев  $\Delta p/p < 0,05$ , при этом для сопл  $\epsilon > 0,94$  и для диафрагм  $\epsilon > 0,97$ .

При изменении расхода изменяется перепад  $\Delta p$  на сужающем устройстве, а следовательно, и отношение  $\Delta p/p$  и  $\epsilon$ . При расчете зависимости  $\Delta p = f(Q)$   $\epsilon$  может быть подсчитано для заданного расхода, однако часто в уравнениях расхода (12.8) и (12.9) используется значение  $\epsilon_{ср}$ , соответствующее среднему расходу  $Q_{ср}$ . При этом необходимо для определения  $\epsilon_{ср}$  отношение  $\Delta p_{ср}/p$  находится по формуле (для всех дифманометров, кроме колокольных)

$$\frac{\Delta p_{ср}}{p} = \frac{\Delta p_n}{p} \left( \frac{Q_{ср}}{Q_{н.п}} \right)^2, \quad (12.11)$$

где  $Q_{\text{ср}}$  — средний расход;  $Q_{\text{в.п}}$  — верхний предел измерения расхода;  $\Delta p_n$  — предельный номинальный перепад давления дифманометра (перепад, соответствующий расходу  $Q_{\text{в.п}}$ ).

При использовании выражения (12.11) следует помнить, что  $\Delta p$  и  $p$  должны иметь одну размерность. Часто  $\Delta p$  выражается в кгс/м<sup>2</sup>, а  $p$  — в кгс/см<sup>2</sup>. Если использовать эти размерности, то формула будет иметь вид

$$\Delta p_{\text{ср}}/p = (p_n/10^4 p) (Q_{\text{ср}}/Q_{\text{в.п}})^2.$$

Очевидно, что при таком способе определения  $\epsilon_{\text{ср}}$  при всех расходах, отличных от  $Q_{\text{ср}}$ , появится дополнительная погрешность из-за отклонения действительного  $\epsilon$  от среднего. Эта погрешность зависит от отношения  $\Delta p_{\text{ср}}/p$ , причем она уменьшается с уменьшением отношения.

Диаметры сужающего устройства и трубопровода обычно задаются значениями при температуре 20 °С и обозначаются соответственно  $d_{20}$  и  $D_{20}$ . Входящие в уравнения расхода диаметры при рабочей температуре  $t$  определяются по формулам

$$d = d_{20} k'_t; \quad D = D_{20} k''_t,$$

где  $k'_t$  и  $k''_t$  — поправочные множители на расширение материала сужающего устройства и трубопровода.

Поправочные множители зависят от материала и температуры среды и определяются по формулам или таблицам. Если температура контролируемой среды находится в интервале  $-20 \div +60$  °С, то обычно принимается  $k'_t = k''_t = 1$ .

Плотность измеряемой среды, входящая в уравнение расхода, определяется по состоянию потока до сужающего устройства (до начала сужения), поэтому термодатчик, измеряющий температуру среды, устанавливается до сужающего устройства и на таком расстоянии от него, чтобы не было искажения им профиля потока на входе в сужающее устройство (на расстоянии от 5 до 20 диаметров трубы  $D_{20}$  в зависимости от  $m$  и диаметра чехла термодатчика). Установка термодатчика за сужающим устройством допускается в случае полной уверенности в неизменности температуры потока при прохождении через сужающее устройство. В этом случае термодатчик устанавливается на расстоя-

нии  $(5 \div 10) D_{20}$  от сужающего устройства.

Согласно [14] избыточное давление среды  $p_n$  необходимо измерять непосредственно у входного торца сужающего устройства через отверстие, которое не должно использоваться для измерения перепада давления. Абсолютное давление  $p$  среды определяется как сумма избыточного  $p_n$  и барометрического  $p_0$  давлений. Для жидкостей  $p_0$  принимается равным 0,1 МПа, для газов оно принимается также равным 0,1 МПа при выполнении условия  $(1 - p_0)/p_n \leq 0,001$ . По измеренным температуре и давлению плотность определяется по таблицам. При отсутствии табличных данных плотность жидкости может быть определена по известной плотности  $\rho_n$  при температуре  $t_n$  в соответствии с формулой

$$\rho = \rho_n [1 - \beta(t - t_n)], \quad (12.12)$$

где  $t$  — рабочая температура среды;  $\beta$  — средний коэффициент объемного теплового расширения жидкости в температурном интервале  $t_n - t$ .

Следует отметить, что способ определения плотности жидкости определяет способ оценки погрешности определения плотности.

Плотность сухого газа при температуре  $T$  и рабочем давлении  $p$  может быть определена по известной плотности  $\rho_n$  газа при нормальных условиях ( $t_n = 20$  °С,  $p_n = 1,0332$  кгс/см<sup>2</sup>, относительная влажность  $\varphi = 0$ ) по формуле

$$\rho = \rho_n p T_n / (T p_n k), \quad (12.13)$$

где  $k$  — коэффициент сжимаемости газа.

Вычисленные  $\alpha$ ,  $\epsilon$ ,  $d$ ,  $\rho$ , будучи подставленными в выражения (12.8) и (12.9), позволят получить статическую характеристику  $\Delta p = f(Q)$  сужающего устройства, с помощью которой определяют расход по измеряемому перепаду давления.

По [14] может быть произведен расчет сужающего устройства, целью которого является определение  $d_{20}$ . В этом случае градуировочная характеристика сужающего устройства задается выбором верхнего предела измерения  $Q_{\text{в.п}}$  по расходу и соответствующим ему перепадом давления  $\Delta p_n$  на сужающем устройстве.

Изложенная выше методика расчета градуировочных характеристик применима только для стандартных сужаю-

щих устройств. Нестандартные сужающие устройства должны градуироваться экспериментально.

#### 12.4. Методика использования сужающих устройств для измерения расхода сред

Стандартные сужающие устройства могут применяться в комплекте с дифманометрами для измерения расхода и количества жидкостей, газов и пара в круглых трубопроводах (при любом их расположении), диаметр которых не менее значений, указанных в § 12.2, если их расчет, изготовление и установка выполнены в соответствии с [14].

При необходимости использования сужающих устройств на трубопроводах меньшего диаметра они должны подвергаться индивидуальной градуировке, т. е. экспериментальному определению зависимости  $\Delta p = f(Q)$ .

Стандартные диафрагмы применяются при соблюдении условия  $0,05 < m < 0,64$ , стандартные сопла — при  $0,05 < m < 0,64$  и сопла Вентури —

Участок трубопровода длиной  $2D$  до и после сужающего устройства должен быть цилиндрическим, гладким, на нем не должно быть никаких уступов, а также заметных глазу наростов и неровностей от заклепок, сварочных швов и т. п. Часто этот участок трубопровода вытачивается на станке вместе с установленным сужающим устройством.

Важным условием является необходимость обеспечения установившегося течения потока перед входом в сужающее устройство и после него. Такой поток обеспечивается наличием прямых участков трубопровода определенной длины до и после сужающего устройства. На этих участках не должны устанавливаться никакие устройства, которые могут искажать гидродинамику потока на входе или выходе сужающего устройства. Длина этих участков должна быть такой, чтобы искажения потока, вносимые коленами, вентилями, тройниками и т. д., смогли сгладиться до подхода потока к сужающему устройству. При этом необходимо иметь в виду, что более существенное значение имеют искажения потока перед сужающим устройством и значительно меньше — за ним, поэтому задвижки и вентили, особенно регулирующие, рекомендуется уста-

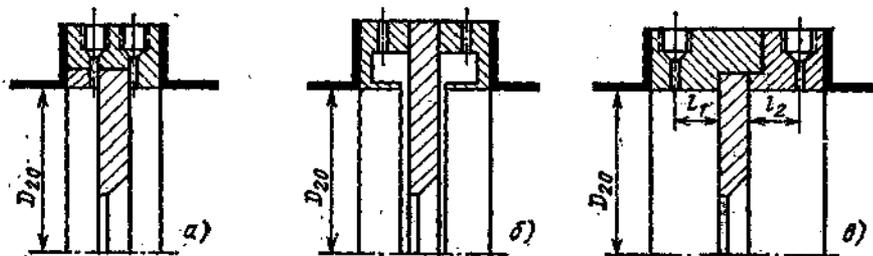


Рис. 12.4. Способы отбора давлений:

а — через отдельные отверстия; б — через кольцевые камеры; в — фланцевый

при  $0,05 < m < 0,6$ . Конкретный тип сужающего устройства выбирается при расчете в зависимости от условий применения, требуемой точности, остаточной потери давления. Однако в любом случае точность измерения расхода газов и пара при использовании сопла выше, чем при использовании диафрагмы. Кроме того, изменение или загрязнение входного профиля сужающего устройства в процессе эксплуатации мало изменяет коэффициент расхода сопла и в значительно большей степени изменяет коэффициент расхода диафрагмы.

Необходимо, чтобы контролируемая среда заполняла все поперечное сечение трубопровода, причем фазовое состояние вещества не должно изменяться при прохождении через сужающее устройство. Конденсат, пыль, газы или осадки, выделяющиеся из контролируемой среды, не должны скапливаться вблизи сужающего устройства.

При установке сужающих устройств необходимо соблюдать ряд условий, сильно влияющих на погрешности измерения. Сужающее устройство в трубопроводе должно располагаться перпендикулярно оси трубопровода. Неперпендикулярность не должна превышать  $1^\circ$ . Ось сужающего устройства должна совпадать с осью трубопровода. Смещение оси отверстия сужающего устройства относительно оси трубопровода не должно превышать  $0,005D_{20}/(0,1+2,3m^2)$ .

навливать после сужающих устройств. Длина  $L_1$  прямого участка перед сужающим устройством зависит от относительной площади  $m$  сужающего устройства, диаметра трубопровода  $D_{20}$  и вида местного сопротивления, расположенного до прямого участка. В табл. 12.1 приведены относительные длины  $L_1/D_{20}$  в зависимости от  $m$  для некоторых разновидностей местных сопротивлений.

Длина прямого участка  $L_2$  после сужающего устройства зависит только от числа  $m$ . Для  $m=0,05$   $L_2=4D_{20}$  и при  $m=0,64$   $L_2=8,2D_{20}$ .

Отбор давлений  $p_1$  и  $p_2$  обычно осуществляется через отдельные цилиндрические отверстия (рис. 12.4, а) либо через две кольцевые камеры, каждая из которых соединяется с внутренней полостью трубопровода кольцевой щелью или группой равномерно распределенных по окружности отверстий (рис. 12.4, б). Конструкция отборных устройств для диафрагм и сопел одинакова. Сужающие устройства с кольцевыми камерами более удобны в эксплуатации, особенно при наличии местных возмущений потока, так как кольцевые камеры обеспечивают выравнивание давления по окружности трубы, что позволяет более точно измерять перепад давления при сокращенных прямых участках трубопровода. Представленные на рис. 12.4, а, б схемы отбора давления (т. е. отбор давлений непосредственно от пе-

Таблица 12.1. Минимальная относительная длина прямых участков до сужающих устройств

Местное сопротивление	m			
	0,05	0,3	0,5	0,64
Колено или тройник	10	16	28	46
Группа колен в одной плоскости	14	22	36	50
Группа колен в разных плоскостях	34	44	62	80
Полностью открытые задвижки	12	14	20	30
Конусные сужения	10	10	14	30
Конусные расширения	16	20	30	54
Гильза термометра диаметром $d \leq 0,03D_{20}$	5	5	5	5

редней и задней плоскостей сужающего устройства) в нормативном документе [14] названы угловым способом отбора. Документ предусматривает другой способ отбора для диа-

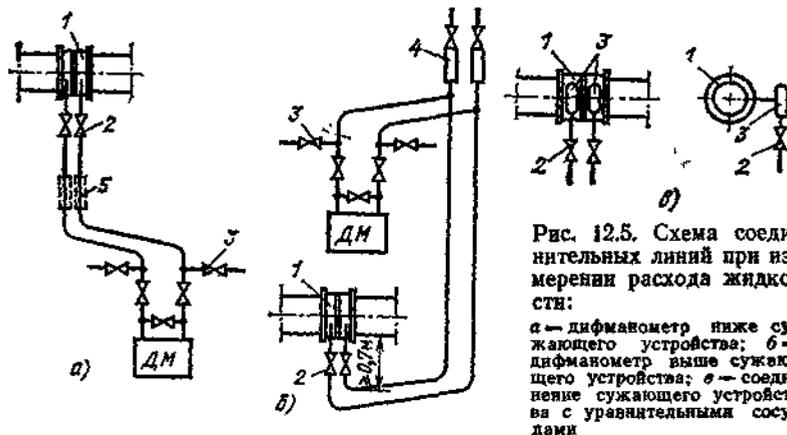


Рис. 12.5. Схема соединительных линий при измерении расхода жидкости: а — дифманометр ниже сужающего устройства; б — дифманометр выше сужающего устройства; в — соединение сужающего устройства с уравнительными сосудами

фрагм — фланцевый, когда перепад давления измеряется через отдельные цилиндрические отверстия, расположенные на расстоянии  $l_1 = l_2 = 25,4$  мм от плоскостей диафрагм (рис. 12.4, а). При таком способе отбора  $\alpha_n$  диафрагм отличается от  $\alpha_n$  при угловом способе отбора.

Дифманометр подключается к сужающему устройству двумя соединительными линиями (импульсными трубками) внутренним диаметром не менее 8 мм. Допускается длина соединительных линий до 50 м, однако из-за возможности возникновения большой динамической погрешности не рекомендуется использовать линии длиной более 15 м.

Для правильного измерения расхода перепад давления на входе дифманометра должен быть равен перепаду давления, развиваемому сужающим устройством, т. е. перепад от сужающего устройства к дифманометру должен передаваться без искажения.

Это возможно в том случае, если давление, создаваемое столбом среды в обеих соединительных трубках, будет одинаковым. В реальных условиях это равенство может нарушаться. Например, при измерении расхода газа

причиной этого может быть скапливание конденсата в неодинаковом количестве в соединительных линиях, а при измерении расхода жидкости, наоборот, скапливание выделяющихся газовых пузырьков. Во избежание этого соединительные линии должны быть либо вертикальными, либо наклонными с уклоном не менее 1:10, причем на концах наклонных участков должны быть конденсато- или газосборники. Кроме того, обе импульсные трубки должны располагаться рядом, чтобы избежать неодинакового нагрева или охлаждения их, что может привести к неодинаковой плотности заполняющей их жидкости и, следовательно, к дополнительной погрешности. При измерении расхода пара важно обеспечить равенство и постоянство уровней конденсата в обеих импульсных трубках, что достигается применением уравнительных сосудов.

К одному сужающему устройству может быть подключено несколько дифманометров. При этом допускается подключение соединительных линий одного дифманометра к соединительным линиям другого.

При измерении расхода жидкости дифманометр рекомендуется устанавливать ниже сужающего устройства 1, что исключает попада-

ние в соединительные линии и дифманометр газа, который может выделяться из протекающей жидкости (рис. 12.5, а). Для горизонтальных и наклонных трубопроводов соединительные линии должны подключаться через запорные вентили 2 к нижней половине трубы (но не в самой нижней части) во избежание попадания в линии газа или осадков из трубопровода. Если дифманометр все же устанавливается выше сужающего устройства (рис. 12.5, б), то в наивысших точках соединительных линий необходимо устанавливать газосборники 4 с продувочными вентилями. Если соединительная линия состоит из отдельных участков (например, при обходе какого-либо препятствия), то газосборники устанавливаются в наивысшей точке каждого участка. При установке дифманометра выше сужающего устройства трубки вблизи последнего прокладываются с U-образным изгибом, опускающимся ниже трубопровода не менее чем на 0,7 м для уменьшения возможности попадания газа из трубы в соединительные линии. При измерении расхода горячих жидкостей ( $t > 100^\circ\text{C}$ ) возможна дополнительная погрешность измерения из-за изменения средней тем-

температуры жидкости в «плюсовой» соединительной линии, что приводит к изменению давления в «плюсовой» камере дифманометра.

Например, при увеличении расхода жидкости и, следовательно, при увеличении  $\Delta p$  будет сжиматься мембранная коробка в «плюсовой» камере дифманометра (рис. 12.7 для случая использования мембранного дифманометра) и расширяться мембранная коробка в «минусовой» камере. Это приведет к затеканию жидкости из плюсовой соединительной линии в дифманометр и заполнению верхней части ее горячей жидкостью из трубы. Таким образом, средняя температура жидкости в этой линии повысится, а плотность уменьшится, в то время как в минусовой линии температура жидкости останется неизменной. Это приведет к разности давлений столбов жидкости в соединительных линиях, причем в рассматриваемом случае эта разность направлена навстречу перепаду давлений в сужающем устройстве, что приведет к занижению показаний расходомера. Поэтому при измерении расхода горячей воды дифманометрами, у которых при изменении  $\Delta p$  изменяется объем плюсовой камеры (это относится ко всем дифманометрам, однако наибольшее изменение объема плюсовой камеры наблюдается у поплавковых дифманометров, а наименьшее — у дифманометров с силовой компенсацией), в соединительные линии рядом с сужающим устройством включаются уравнивательные сосуды 3 (рис. 12.5, в) — вертикальные цилиндры достаточно большого сечения. Большое сечение сосудов позволяет уменьшить изменение высоты столбов жидкости в соединительных линиях, температура которых изменяется, и соответственно минимизировать дополнительную погрешность. При измерении расхода агрессивных сред в соединительных линиях возможно ближе к сужающему устройству устанавливаются разделительные сосуды 5 (включенные разделительных сосудов для случая, когда плотность контролируемой жидкости ниже плотности разделительной, показано на рис. 12.5, а). Соединительные линии между разделительным сосудом и дифманометром заполнены разделительной жидкостью, частично этой жидкостью заполнен сам сосуд. Остальная часть сосуда и линии до сужающего устройства заполнены контролируемой средой. Таким образом, поверхность раздела контролируемая среда — разделительная жидкость находится внутри сосуда, причем уровни раздела в обоих сосудах должны быть одинаковыми.

Разделительная жидкость выбирается таким образом, чтобы она химически не взаимодействовала с контролируемой средой, не смешивалась с ней, не давала отложений и не была агрессивной по отношению к материалу сосудов, соединительных линий и дифманометра. Чаще всего в качестве разделительной жидкости используются вода, минеральные масла, глицерин, водоглицериновые смеси.

При измерении расхода газа дифманометр рекомендуется устанавливать выше сужающего устройства 1, чтобы конденсат, образовавшийся в соединительных линиях, мог стекать в трубопровод (рис. 12.6, а). Соединительные линии нужно подключать через запорные вентили 2 к верхней половине сужающего устройства, их прокладку желательно производить вертикально. Если вертикальная прокладка соединительных линий невозможна, то

их следует прокладывать с наклоном в сторону трубопровода или конденсатосборников 3. Подобные требования должны выполняться и при расположении дифманометра ниже сужающего устройства (рис. 12.6, б). При измерении расхода агрессивного газа в соединительные линии должны включаться разделительные сосуды. Продувка соединительных линий осуществляется через вентили 3, 4, 6.

При измерении расхода перегретого водяного пара неизолированные соединительные линии оказываются заполненными конденсатом.

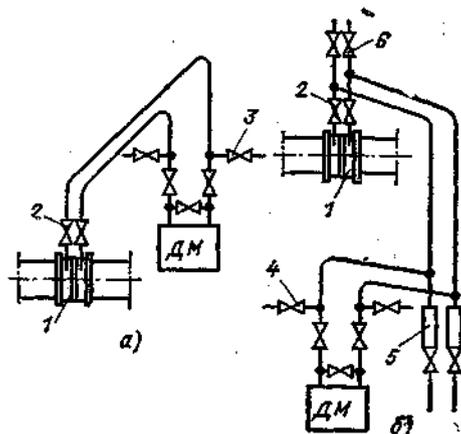


Рис. 12.6. Схема соединительных линий при измерении расхода газа с установкой дифманометра выше (а) и ниже (б) сужающего устройства

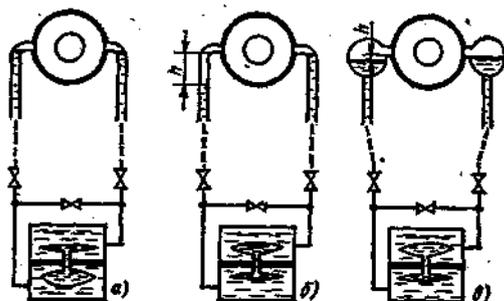


Рис. 12.7. Схема, поясняющая необходимость применения уравнивательных конденсационных сосудов при измерении расхода пара

Очевидно, что во избежание дополнительной погрешности уровень конденсата и его температура в обеих линиях должны быть одинаковыми при любом расходе.

Для стабилизации верхних уровней конденсата в обеих соединительных линиях вблизи сужающего устройства устанавливаются уравнивательные конденсационные сосуды. Назначение уравнивательных сосудов можно пояснить с помощью рис. 12.7. Предположим, что при отсутствии уравнивательных сосудов и при нулевом расходе пара уровень конденсата в обеих импульсных трубках одинаков. При этом перепад давления на сужающем устройстве равен нулю, верхняя мембранная коробка дифманометра (расположенная в «минусовой»

камере) сжата, а нижняя (расположенная в «плюсовой» камере), наоборот, растянута (рис. 12.7, а), так как жесткость нижней коробки меньше. При появлении расхода на сужающем устройстве появляется перепад  $\Delta p$ , заставляющий нижнюю мембранную коробку сжиматься, а верхнюю растягиваться (рис. 12.7, б). Из-за изменения объемов коробок в нижнюю, «плюсовую» камеру дифманометра будет затекать конденсат из «плюсовой» импульсной трубки, что приведет к понижению уровня в ней на  $h$ . Из верхней, «минусовой» камеры дифманометра конденсат будет выталкиваться в импульсную трубку и в паропровод, но высота столба конденсата останется неизменной. Образовавшаяся разница уровней конденсата создает перепад давления  $h\rho g$ , направленный навстречу перепаду давления  $\Delta p$  в сужающем устройстве. Таким образом, на дифманометр будет действовать перепад

$$\Delta p_d = \Delta p - h\rho g,$$

т. е. показания расходомера будут заниженными. Нетрудно заметить, что абсолютная погрешность измерения будет расти с увеличением расхода, так как при этом увеличивается  $h$ .

Очевидно, что погрешность можно снизить уменьшением  $h$ . Для этого на концах импульсных трубок устанавливают уравнительные конденсационные сосуды (рис. 12.7, в) — горизонтально расположенные цилиндры большого сечения. Они изготавливаются двух разновидностей: сосуд уравнительный конденсационный большой (для поплавковых дифманометров)

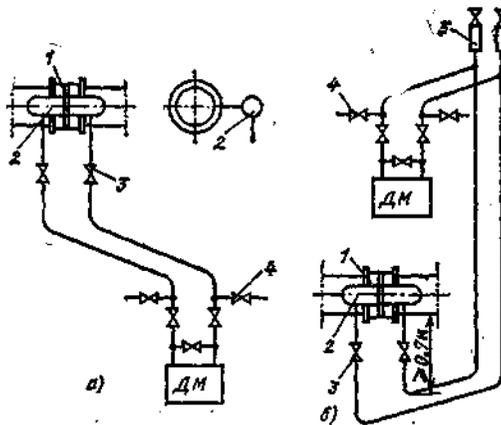


Рис. 12.8. Схема соединительных линий при измерении расхода газа с установкой дифманометра ниже (а) и выше (б) сужающего устройства

и малый (для сильфонных и мембранных дифманометров). Так как сечение этих сосудов велико, вытекание из них конденсата мало изменит его уровень, так что перепад  $\Delta p_d$ , измеряемый дифманометром, можно считать равным перепаду  $\Delta p$  в сужающем устройстве.

При измерении расхода пара дифманометр следует располагать из ниже сужающего устройства 1 и уравнительных сосудов 2 (рис. 12.8, а) для облегчения удаления воздуха из соединительных линий. Допускается дифманометр располагать выше сужающего устройства, но в верхней точке соединительных линий в этом

случае необходимо устанавливать газосборники 5 (рис. 12.8, б). Позиции 3, 4 — запорный и продувочный вентили.

## 12.5. Оценка погрешности измерения расхода

Уравнение расхода (12.5) и (12.6) показывают, что значение расхода является результатом косвенных измерений. Поэтому погрешность измерения расхода может быть определена в соответствии с выражениями (2.30) или (2.31), если известны погрешности измерения величин, входящих в уравнение расхода (12.5) и (12.6).

Так, по известным среднеквадратическим погрешностям  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $\sigma_d$ ,  $\sigma_\rho$   $\sigma_{\Delta p}$  можно определить среднеквадратическую погрешность измерения массового расхода при отсутствии корреляционной зависимости между погрешностями  $\sigma_i$  по формуле (2.29):

$$\sigma_{Q_M} = \left[ \left( \frac{\partial Q_M}{\partial \alpha} \sigma_\alpha \right)^2 + \left( \frac{\partial Q_M}{\partial \epsilon} \sigma_\epsilon \right)^2 + \left( \frac{\partial Q_M}{\partial d} \sigma_d \right)^2 + \left( \frac{\partial Q_M}{\partial \rho} \sigma_\rho \right)^2 + \left( \frac{\partial Q_M}{\partial (\Delta p)} \sigma_{\Delta p} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (12.14)$$

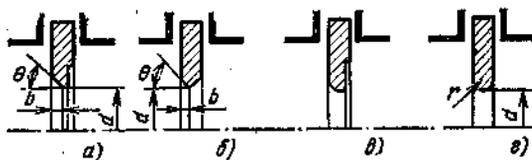
Несмотря на кажущуюся простоту выражения (12.5), его использование для оценки погрешности измерения расхода требует определенных допущений. Вызвано это тем, что уравнение расхода (12.5) и (12.6) содержат две группы величин, различающихся способом получения их значений. К первой группе относятся  $\alpha$  и  $\epsilon$ , значения которых найдены путем обработки большого числа измерений и для которых известны среднеквадратические погрешности  $\sigma_\alpha$  и  $\sigma_\epsilon$ . Ко второй группе величин относятся  $d$ ,  $\rho$  и  $\Delta p$ , которые определяются по результатам однократных измерений и для которых известны максимальные погрешности  $\delta_d$ ,  $\delta_\rho$ ,  $\delta_{\Delta p}$ . Суммирование среднеквадратических погрешностей с максимальными по формуле (12.14) недопустимо. Поэтому для возможности использования (12.14) принимается, что для второй группы величин среднеквадратическая погрешность измерения равна половине максимальной (предполагается нормальный закон распределения отдельных погрешностей при выбранной доверительной вероятности 0,95).

Таким образом, значения  $\sigma_a$ ,  $\sigma_p$  и  $\sigma_{\Delta p}$  будут равны соответственно  $\delta_a/2$ ,  $\delta_p/2$ ,  $\delta_{\Delta p}/2$ . Обычно дифманометры расходомеры снабжаются устройствами для извлечения квадратного корня из измеряемого перепада  $\Delta p$  для получения равномерной по расходу шкалы. В этом случае класс дифманометра характеризует точность измерения  $\sqrt{\Delta p}$ , а не  $\Delta p$  и в формуле (12.4) слагаемое  $(\frac{\partial Q_m}{\partial \Delta p} \sigma_{\Delta p})^2$  следует заменить на  $(\frac{\partial Q_m}{\partial (\sqrt{\Delta p})} \sigma_{\sqrt{\Delta p}})^2$  причем  $\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \delta_{\sqrt{\Delta p}}/2$ .

Вычисляя производные, указанные в уравнении (12.14), получаем для относительной погрешности

$$\sigma_{Q_m} = [\sigma_a^2 + \sigma_p^2 + (2\sigma_d)^2 + (\frac{\sigma_p}{2})^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2]^2 \quad (12.15)$$

При изготовлении сужающих устройств принимаются очень малые зна-



ния перепада, входящей в (12.16). Отдельные составляющие погрешности измерения расхода определяются по [14].

## 12.6. Применение сужающих устройств при малых числах Рейнольдса

На практике часто возникает необходимость измерения расхода при малых числах Рейнольдса  $Re < Re_{lim}$ , например при измерении расхода вязких веществ, газов с малой плотностью, при измерениях в трубопроводах малого диаметра и т. д.

Существует большое число различных сужающих устройств для малых и средних чисел Рейнольдса. Все они по характеру своей работы и коэффициентам расхода являются промежуточными между стандартными диафрагмой и соплом.

Наиболее простым сужающим устройством является диафрагма с входным конусом (рис. 12.9, а). Характеристика этого преобразователя расхода зависит от отношения  $d/D$ , угла входного конуса  $\theta$  и отношения  $d/b$  — диаметра отверстия к ширине конуса диафрагмы. Область применения диафрагмы с входным конусом — от  $Re=40 (d/D=0,1)$  до  $Re=50\,000$

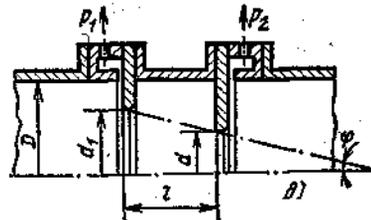


Рис. 12.9. Сужающие устройства для измерения расхода при малых числах  $Re$

чения допусков на диаметр отверстия  $d$ , в силу чего  $\sigma_d$  оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с остальными слагаемыми и их можно исключить. Окончательно для среднеквадратической погрешности имеем

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_p^2 + \sigma_p^2/4 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2} \quad (12.16)$$

Предельная относительная погрешность  $\delta_Q$  измерения расхода определяется как удвоенная среднеквадратическая погрешность  $\delta_Q = 2\sigma_Q$ . Неправильно определять предельную относительную погрешность измерения расхода  $Q$  через класс  $K_{в.п}$  вторичного прибора и его верхний предел измерения  $Q_{в.п}$  по формуле  $\delta_Q = K_{в.п} Q_{в.п}/Q$ . Класс вторичного прибора определяет предельную погрешность, с которой изменяется входная величина вторичного прибора. Эта погрешность является частью погрешности  $\sigma_{\sqrt{\Delta p}}$  измере-

ния ( $d/D=0,3 \div 0,5$ ): диаметр трубопровода — от 12,5 мм и более. Эта диафрагма дает хорошее постоянство коэффициента расхода при  $d/D=0,1 \div 0,2$ . Международная организация по стандартизации (ИСО) рекомендует эту разновидность диафрагмы для стандартизации.

Другой разновидностью диафрагмы с конечным входом является диафрагма с двойным конусом или двойным скоом (рис. 12.9, б). У таких диафрагм на зависимость от числа  $Re$  сильно влияет входной угол  $\theta$  и ширина входной части  $b$ . Так, при  $\theta=50^\circ$  и  $b=0,06d$  коэффициент расхода постоянен в диапазоне изменения  $Re$  от 20 до 30 000. Рекомендуемые значения  $m$  таких диафрагм составляет 0,06—0,12. При  $\theta=15^\circ$  и  $b=0,3d$  допустимый диапазон изменения чисел  $Re$  равен 3000—100 000 при  $m=0,16 \div 0,25$ . Перспективной считается диафрагма с  $\theta=40^\circ$ , для которой рекомендуется  $m=0,09 \div 0,25$  и  $d \gg \gg 10$  мм для диапазона изменения чисел  $Re=200 \div 10\,000$ . Следует отметить, что при уменьшении диаметра отверстия  $d$  увеличивается трудность точного их изготовления, но в то же время чрезмерное увеличение относительной площади  $m$  нецелесообразно. Так, при увеличении  $m$  сильнее сказывается изменение профиля скоростей (следствием чего является изменение коэффициента расхода).

Сошло с профилем «четверть круга» (рис. 12.9, а) имеет постоянное значение  $\alpha$  в диапазоне изменения чисел  $Re$  от 200—700 до 56 000—200 000 (в зависимости от  $m$ ). Относительная площадь может изменяться в пределах от 0,05 до 0,49, наиболее целесообразным считается диапазон от 0,25 до 0,36. Радиус закругления проточной части желательнее иметь не менее 0,6 мм.

Сошло с профилем «полукруга» (рис. 12.9, б) рекомендуется использовать при  $r/d=0,125$  и для  $m \leq 0,2$ ; область  $Re$  — от 80—300 (в зависимости от  $m$ ) до 10 000.

Для измерения расхода при средних значениях  $Re$  может быть использована сдвоенная диафрагма (рис. 12.9, в), которая состоит из двух диафрагм, расположенных на определенном расстоянии  $l$  друг от друга. Обычно  $l=(0,2 \div 0,8)D$ , рекомендуется  $l=0,5D$ . Давление  $p_1$  измеряется у передней плоскости первой диафрагмы, а давление  $p_2$  — у задней плоскости второй диафрагмы. Сдвоенные диафрагмы применяются при  $m=d^2/D^2 \approx (0,1 \div 0,6)$ ,  $\varphi=(14 \pm 2)^\circ$  в диапазоне  $Re=3000 \div 300\,000$ . Недостатком сдвоенных диафрагм является возможность засорения внутреннего пространства между диафрагмами.

Общим для всех рассмотренных сужающих устройств является необходимость их индивидуальной градуировки вместе с прилегающими участками трубопровода в пределах тех чисел  $Re$ , при которых предполагается их применение.

## 12.7. Особые случаи измерения расхода

Помимо рассмотренного в предыдущем параграфе случая измерения расхода при малых числах Рейнольдса имеется еще ряд случаев, требующих особого подхода к использованию сужающих устройств. К их числу относится измерение расхода загрязненных сред в измерение расхода на входе и выходе трубопровода.

При измерении расхода *загрязненных жидкостей* и особенно газов у стандартной диафрагмы на горизонтальном или наклонном трубопроводе могут образоваться отложения. Поэтому в качестве сужающих устройств для таких потоков используются *сегментные диафрагмы* (рис. 12.10), отверстия которых располагаются в нижней части сечения трубопровода. В этом случае примеси свободно проходят через отверстие и не образуют отложений. Прямоугольная кромка диафрагмы со стороны потока должна быть острой. Обычно используется отбор давлений  $p_1$  и  $p_2$  с помощью отверстий, располагающихся в верхней части диафрагмы (со стороны, противоположной отверстию истечения). Чаще всего они располагаются по вертикальному диаметру, однако допускается некоторое (до  $20^\circ$  при больших  $m$ ) отклонение. Рекомендуемое  $m$  для сегментных диафрагм находится в пределах 0,1—0,5. Значения  $Re_{мин}$  для  $m=0,1$  и  $m=0,5$  соответственно равны 10 000 и 120 000. Значение расхода может быть определено по формулам (12.5) и (12.6), причем значение  $\alpha$  принимается тем же, что и для стандартных диафрагм (определяются по тем же формулам или номограммам).

Длины прямых участков для сегментных диафрагм выбираются такими же, как для

стандартных. Следует отметить, что притупление входной кромки сегментных диафрагм меньше влияет на коэффициент расхода, чем стандартных.

Для измерения расхода жидкостей, из которых могут выделяться газы, также можно использовать сегментные диафрагмы, однако отверстия истечения их должны располагаться в верхней части сечения трубы.

Для измерения расхода *сред на входе в трубопровод или на выходе из него* можно применять стандартные диафрагмы и сопла при соблюдении определенных условий их установки. При измерении *расхода на входе* на расстоянии не менее  $20D$  по оси трубы и  $10D$  перпендикулярно этой оси не должно быть никаких препятствий, торцевая поверх-

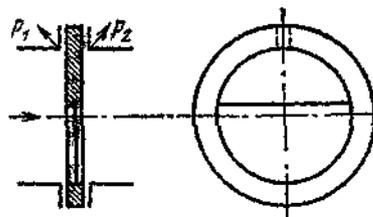


Рис. 12.10. Сегментная диафрагма

ность диафрагмы или сопла должна быть гладкой в пределах круга диаметром не менее  $1,5d$ . При соблюдении этих условий исходный коэффициент расхода  $\alpha_m$  не зависит от относительной площади  $m$  сужающего устройства и равен 0,60 для диафрагм и 0,99 для сопел (для всех  $m$   $Re_{мин}=55\,000$ ).

Поправочный множитель на неостроту входной кромки диафрагмы определяется так же, как и при установке ее внутри трубы. Отбор давлений  $p_1$  и  $p_2$  осуществляется до сужающего устройства, т. е. в пространстве, из которого происходит истечение, и непосредственно за сужающим устройством. Отбор  $p_2$  может осуществляться как через отверстие, так и посредством кольцевой камеры.

При  $Re < 55\,000$  использование стандартных сужающих устройств для измерения расхода на входе производится не может из-за непостоянства  $\alpha_m$ .

При измерении расхода на выходе из трубопровода в пространстве истечения не должно быть никаких препятствий на расстоянии не менее  $10D$  по оси трубы и  $5D$  перпендикулярно этой оси.

Отбор давлений  $p_1$  производится перед сужающим устройством, а  $p_2$  — в пространстве, куда происходит истечение.

Если среда внутри и снаружи трубопровода одинаковая (например, происходит истечение газа в газовый объем), для измерения расхода можно применять стандартные диафрагмы и сопла, причем для диафрагм  $\alpha$  такое же, как при нормальной установке (для тех же  $m$ ), для сопел  $\alpha$  уменьшается на 5%. Граничные числа  $Re_{мин}$  такие же, как при нормальной установке.

При истечении жидкости в газ стандартные сопла не применяются из-за возможности отрыва струи от стенки сопла в его цилиндрической части. В этом случае применяются стандартные диафрагмы, расчет которых производится по методике для нормальных измерений.

В заключение дадим общую характеристику расходомеров с сужающими устройствами, которые получили исключительно широкое применение из-за следующих их основных достоинств:

1) сужающие устройства — простые, дешевые и надежные средства измерения расхода;

2) сужающие устройства универсальны, т. е. могут применяться для измерения расхода практически любых однофазных (иногда и двухфазных) сред в широком диапазоне давлений, температур, расходов и диаметров трубопровода;

3) градуировочная характеристика стандартных сужающих устройств может быть определена расчетным путем, поэтому отпадает необходимость в образцовых расходомерных установках;

4) возможность использования для различных условий измерения однотипных по устройству дифманометров и вторичных приборов; индивидуальным для каждого расходомера является только сужающее устройство.

Наряду с достоинствами расходомеры с сужающими устройствами имеют и недостатки, о некоторых из которых упоминалось выше. Из них наиболее важными являются:

1) нелинейная зависимость между расходом и перепадом, что не позволяет измерять расходы менее  $0,3 Q_{вн}$  из-за высокой погрешности измерения;

2) необходимость индивидуальной градуировки сужающих устройств при измерении расходов при малых числах  $Re$  или в трубах малого диаметра;

3) расходомеры с сужающими устройствами имеют ограниченную точность, причем погрешность измерения колеблется в широких пределах (1,5—3%) в зависимости от состояния сужающего устройства, диаметра трубопровода, постоянства давления и температуры измеряемой среды;

4) ограниченное быстродействие (инерционность) из-за наличия длинных импульсных трубок и в связи с этим трудности при измерении быстроменяющихся расходов.

## Глава тринадцатая

### РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ. ТЕПЛОМЕРЫ

Рассмотренные в предыдущей главе расходомеры переменного перепада давления (с сужающими устройствами) находят наибольшее распространение в промышленности. Однако из-за существующих ограничений на их применение стандартные сужающие устройства могут быть использованы не всегда. В этих случаях используются другие типы расходомеров, наиболее употребительные из которых рассмотрены ниже.

#### 13.1. Ротаметры

Ротаметры используются в промышленных и лабораторных условиях для измерения небольших объемных расходов жидкостей (верхние пределы измерения ротаметров по воде находятся в пределах от 0,04 до 16 м<sup>3</sup>/ч) или газов (верхние пределы измерения ротаметров по воздуху находятся в пределах от 0,063 до 40 м<sup>3</sup>/ч) в вер-

тикальных трубопроводах диаметром 4—100 мм.

В простейшем виде ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку 1 (рис. 13.1), внутри которой располагается поплавков 2. Поплавки могут иметь различную форму. Одной из форм является цилиндрическая с нижней конической частью и верхним бортиком с вырезанными на нем косыми канавками. Контролируемая среда при протекании через эти канавки обеспечивает вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки и устраняется его трение о стенки.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой зазор  $f_0$ , при прохождении через который жидкость сужается и, таким образом, возникает разность между давлением  $p_1$  в сечении  $AA$  до начала сужения и давлением  $p_2$  в самом узком сечении  $BB$  кольцевой струи. С подъемом по-

плавка площадь  $f_k$  увеличивается, что в случае неизменного расхода приведет к уменьшению разности  $p_1 - p_2$ . Принцип действия ротаметра основан на уравнивании при любом расходе силы тяжести поплавка силами, действующими на него со стороны жидкости. При этом вертикальное положение поплавка будет однозначно связано с расходом.

Рассмотрим подробнее силы, действующие на поплавок. На поплавок,

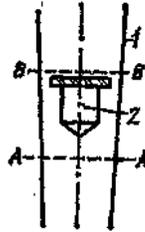


Рис. 13.1. Схема ротаметра

имеющий объем  $V$ , наибольшее сечение  $f$ , среднюю плотность  $\rho_n$ , сверху вниз действует сила тяжести

$$G = V\rho_n g.$$

Снизу вверх на поплавок действует:

1) сила, обусловленная разностью статических давлений  $p_1 - p_2$ , возникающая вследствие ускорения потока в кольцевом зазоре между стенкой и поплавком,  $F = (p_1 - p_2)f$ ;

2) динамический напор  $W = \varphi(\rho v^2/2)f$ , где  $\varphi$  — коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от его формы;  $\rho$  — плотность среды;  $v$  — ее скорость в сечении AA;

3) сила трения потока о боковую поверхность поплавка  $N = kv_k^2 f_0$ , где  $k$  — коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса и степени шероховатости поплавка;  $v_k$  — средняя скорость потока в кольцевом зазоре;  $n$  — показатель степени, зависящий от скорости;  $f_0$  — площадь боковой поверхности поплавка.

Поплавок будет неподвижно висеть в потоке жидкости или газа, если будет соблюдаться равенство сил, действующих на него сверху и снизу:

$$G = (p_1 - p_2)f + W + N. \quad (13.1)$$

Отсюда можно получить уравнение

$$p_1 - p_2 = (G - W - N)/f. \quad (13.2)$$

Если пренебречь силами  $W$  и  $N$ , то можно записать

$$p_1 - p_2 = G/f, \quad (13.3)$$

т. е. перепад давления на поплавке оказывается не зависящим от расхода (в действительности из-за увеличения  $W$  и  $N$  перепад с увеличением расхода несколько уменьшается). Поэтому ротаметры относятся к группе расходомеров постоянного перепада. Действие ротаметра можно пояснить, используя выражение (13.3).

Предположим, что при исходном расходе  $Q_0$  поплавок занимает исходное положение, характеризующееся площадью кольцевого зазора  $f_{k1}$ . При этом на поплавок действует перепад  $p_1 - p_2$ , при котором выполняется равенство (13.3). При увеличении расхода в первый момент положение поплавка и  $f_k$  неизменны, в силу чего  $p_1 - p_2$  начнет увеличиваться. При этом нарушается равенство (13.3) и поплавок начнет подниматься вверх. При этом  $f_k$  будет увеличиваться (из-за конусного профиля трубки), что приведет к уменьшению  $p_1 - p_2$ . Подъем поплавка будет осуществляться до тех пор, пока вновь не восстановится равенство (13.3). Очевидно, что любому расходу будет соответствовать определенная площадь  $f_k$  кольцевого зазора, т. е. определенное положение поплавка. Уравнение, связывающее  $Q_0$  и  $f_k$ , обычно записывается в виде, аналогичном уравнению расхода для расходомеров переменного перепада:

$$Q_0 = \alpha f_k V \sqrt{2gv(\rho_n - \rho)/(\rho f)}. \quad (13.4)$$

Из (13.4) следует, что при  $\alpha = \text{const}$  существует линейная зависимость между  $Q_0$  и  $f_k$ . Однако при конической форме трубки линейной зависимости между  $Q_0$  и перемещением поплавка  $H$  не будет из-за нелинейной зависимости  $f_k = \varphi(H)$ . Кроме того, в реальных условиях при перемещении поплавка несколько изменяется  $\alpha$ . Поэтому использование равномерной шкалы для ротаметров обуславливает определенную долю в общей погрешности измерения.

Из (13.3) следует также, что положение поплавка зависит не только от расхода, но и от плотности контролируемой среды, т. е. градуировка ротаметра должна производиться с учетом ее. Из-за большого разнообразия контролируемых сред ротаметры подразделяются на две группы: для жидкостей, которые градуируются на воде, и для газов, которые градуируются на воздухе.

Если такие ротаметры используются для измерения расхода других сред, то их показания нужно умножать на поправочный множитель  $k$ . Если вязкости измеряемой и градуировочной сред близки, то

$$k = \sqrt{\frac{\rho_{гр}(\rho_n - \rho)}{\rho(\rho_n - \rho_{гр})}}$$

где  $\rho_{гр}$  и  $\rho$  — градуировочная и действительная плотность среды.

Обычно для газов  $\rho \ll \rho_n$ , и в этом случае  $k = \sqrt{\rho_{гр}/\rho}$ . Переградуировка ротаметра в соответствии с (13.4) может быть осуществлена изменением  $\rho_n$  например путем изготовления поплавка из другого материала или пустотелым.

Погрешность измерения расхода ротаметром может быть определена через погрешности величин, составляющих формулу (13.4) в соответствии с (2.30). Наибольшее влияние на погрешность оказывает изменение  $\alpha$  (например, из-за изменения структуры потока вследствие турбулентности), погрешность определения плотности среды, отличие действительных размеров трубки и поплавка от расчетных, отличие массы поплавка от расчетного. Эти погрешности имеют достаточно высокие значения, причем некоторые из них возрастают к началу шкалы. Это обуславливает, во-первых, невысокий класс ротаметров общепромышленного назначения (обычный класс 2,5), во-вторых, минимальный измеряемый расход  $Q_{мин}$ , равный обычно  $0,2 Q_{в.п}$  [т. е. диапазон измерения равен  $(0,2 \div 1) Q_{в.п}$ ]. Погрешность ротаметров может быть уменьшена в 2—3 раза индивидуальной градуировкой.

Обычно в ротаметрах используются стеклянные конические трубки, на наружной поверхности которых нанесена шкала. Указателем служит верхняя горизонтальная плоскость поплавка. Ротаметры со стеклянной конусной трубкой применяются для измерения расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под давлением не более 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>).

Для измерения расхода сред под избыточным давлением до 6,4 МПа (64 кгс/см<sup>2</sup>) используются ротаметры с металлической конической трубкой. Обычно такие ротаметры снабжаются дифференциально-трансформаторными или пневматическими преобразователями для дистанционной переда-

чи показаний. Класс ротаметров дифференциально-трансформаторным преобразователем в комплекте с вторичным прибором равен 2,5.

Ротаметры с выходным пневматическим сигналом 0,2—1 кгс/см<sup>2</sup> выпускаются классов 1,5 и 2,5.

Материал поплавков: сталь, алюминий, бронза, эбонит, пластмассы — не должен подвергаться коррозии в контролируемой среде. Ротаметры обладают рядом достоинств: простота устройства; возможность измерения малых расходов и на трубопроводах малых диаметров; практически равномерная шкала.

Недостатками ротаметров являются необходимость установки только на вертикальных участках трубопроводов; трудности дистанционной передачи показаний и записи; непригодность для измерения расхода сред с высокими давлением и температурой.

## 13.2. Тахометрические расходомеры

Тахометрическими называются расходомеры, в которых скорость движения рабочего тела пропорциональна объемному расходу измеряемой среды. В большинстве случаев рабочее тело — преобразователь расхода (турбинка, шарик и т. п.) — под воздействием потока вращается. В зависимости от устройства тахометрические расходомеры подразделяются на турбинные, шариковые и камерные.

Тахометрические преобразователи расхода могут использоваться как в счетчиках количества, так и в расходомерах. В первом случае преобразователь расхода (например, турбинка) связан со счетным механизмом. Тахометрические расходомеры содержат электрические тахометрические преобразователи частоты вращения чувствительного элемента в электрический сигнал, измеряемый затем показывающим прибором. Такие электрические преобразователи скорости оказывают незначительное тормозящее действие на подвижный элемент (по сравнению с механической передачей в счетчиках), в силу чего точность тахометрических расходомеров выше точности счетчиков с механическим редуктором. Тахометрические приборы измеряют объемные расходы. При необходимости измерения массовых расходов они дол-

жны снабжаться плотномерами и вычислительным устройством.

Тахометрические расходомеры применяются для измерения расхода различных жидкостей (реже газов), причем некоторые их разновидности могут использоваться на загрязненных жидкостях.

Погрешность измерения и потери статического давления на расходомере зависят от расхода и вязкости жидкости. Поэтому важными техническими данными таких приборов являются минимальный измеряемый расход (нижний предел измерения) и потеря давления на них.

Турбинные расходомеры применяются для измерения расхода различных жидкостей за исключением очень

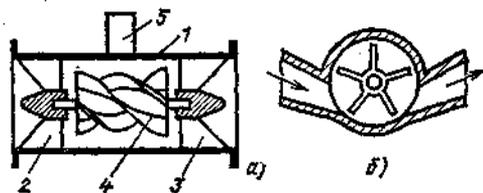


Рис. 13.2. Устройство турбинных преобразователей расхода:

а — с аксиальной турбинкой; б — с тангенциальной турбинкой

вязких и загрязненных. Для них важной является смазывающая способность измеряемой среды, поэтому наиболее целесообразно их использование на нефтепродуктах. Для измерения расхода газа турбинные расходомеры применяются редко. Это связано с тем, что из-за малой плотности газа достаточно большой вращающий момент получается только при больших расходах. Это уменьшает диапазон измерения расходомера и повышает порог чувствительности. Кроме того, в газовой среде ускоряется износ подшипников.

На рис. 13.2, а схематично показано устройство турбинного преобразователя расхода жидкости. Корпус преобразователя 1 представляет собой отрезок трубы с двумя фланцами для присоединения его к трубопроводу. Внутри корпуса установлены струевыпрямители 2 и 3, соединенные неподвижной осью, на которой расположена турбинка 4. В расходомерах частота вращения турбинки, пропорциональная объемному расходу, с помощью тахометрического преобразователя 5 (см.

рис. 13.2, а) преобразуется в частоту выходного напряжения и затем с помощью специальной схемы — в аналоговый выходной сигнал. В счетчиках количества частота вращения турбины пропорциональна количеству протекшего вещества, измеряется счетным механизмом, соединенным с осью турбинки шестеренчатым редуктором и магнитной муфтой.

Турбинки тахометрических расходомеров подразделяются на аксиальные и тангенциальные. У первых ось совпадает с направлением потока, у вторых она перпендикулярна потоку.

Аксиальные турбинки имеют лопасти винтовой формы (на рис. 13.2, а показана четырехлопастная турбинка). При малом диаметре турбинок число лопастей мало (4—6), но они имеют большую длину. При больших диаметрах турбинок число лопастей велико (до 20), но их высота и длина невелики (относительно диаметра).

Конструкции тангенциальных турбинок разнообразны. В качестве примера на рис. 13.2, б показана турбинка серийно выпускаемых одноструйных водосчетчиков.

При незначительных нагрузках на турбинку ее частота вращения  $\omega$  пропорциональна объемному расходу  $Q_v$ ; однако на характер этой зависимости влияют вязкость  $\nu$  и плотность  $\rho$  измеряемой среды, момент сопротивления  $M_c$  от трения в опорах и реакции тахометрического преобразователя частоты вращения (поз. 5 на рис. 13.2, а) или механического счетчика, конструктивные параметры турбинки

Примером турбинного тахометрического расходомера, использование которого возможно на ТЭС, является расходомер топчного мазута ТМ-1. Эти расходомеры имеют дифференциально-трансформаторный тахометрический преобразователь, сигнал от которого поступает к нормирующему преобразователю с выходным сигналом 0—5 мА. Преобразователи расхода таких расходомеров изготавливаются с диаметрами условных проходов от 32 до 200 мм для давления до 6,4 МПа и температуры от 50 до 150 °С. Расходомеры могут иметь шкалы с верхними пределами 6,3—240 м³/ч. Диапазон измерения этих расходомеров (0,2 ÷ 1)  $Q_{в.п.}$  В диапазоне (0,3 ÷ 1)  $Q_{в.п.}$  предельная основная погрешность равна  $\pm 2\%$  и в диапазоне (0,2 ÷ 0,3)  $Q_{в.п.}$

$\pm 2,5\%$ . Следует отметить, что в настоящее время турбинные тахометрические расходомеры являются одними из наиболее точных. Существуют серийно выпускаемые расходомеры с основной погрешностью  $0,5\%$ . Эта погрешность может быть уменьшена индивидуальной градуировкой.

Достоинством турбинных расходомеров является возможность измерения расходов в широком диапазоне ( $5 \cdot 10^{-9} - 2 \text{ м}^3/\text{с}$ ) на трубопроводах диаметром  $4 - 750 \text{ мм}$  при давлениях до  $250 \text{ МПа}$  и температурах от  $-240$  до  $+700^\circ\text{C}$ , а также большой диапазон измерения. При больших скоростях и диаметрах труб диапазон измерения  $Q_{в.п.}/Q_{мин}$  достигает  $15 - 20$ , при малых скоростях и малых диаметрах труб  $5 - 10$ . Кроме того, такие расходомеры обладают малой инерционностью.

Однако тахометрические турбинные расходомеры имеют и недостатки,

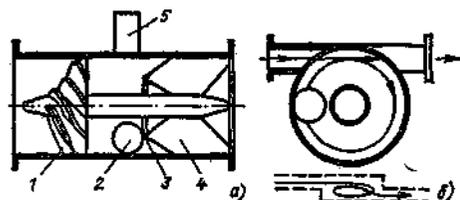


Рис. 13.3. Схема шариковых преобразователей расхода:

а — для больших расходов; б — для малых расходов

ограничивающие их применение: влияние вязкости контролируемой среды, износ опор (нельзя, например, измерять расход сред, содержащих взвешенные частицы, особенно если они обладают абразивными свойствами).

**Шариковыми** называются тахометрические расходомеры, подвижным элементом которых является шарик, непрерывно движущийся в одной плоскости по внутренней поверхности трубы под воздействием предварительно закрученного потока. Скорость движения шарика по окружности трубы пропорциональна объемному расходу жидкости. Схема шарикового преобразователя для средних и больших расходов представлена на рис. 13.3, а. Поток жидкости, закрученный формирователем 1 в винтовом направлении, вызывает движение шарика 2 по окружности. От перемещения вдоль трубы шарик удерживается ограничи-

тельным кольцом 3, за которым располагается струевыпрямитель 4 для выпрямления закрученного потока. На внешней стороне немагнитного корпуса располагается тахометрический преобразователь 5 для преобразования частоты вращения шарика в частотный электрический сигнал.

Для небольших расходов применяется конструкция, представленная на рис. 13.3, б. Здесь нет специального формирователя для закручивания потока, а движение шарика по окружности вызывается тангенциальным подводом жидкости. В шариковых расходомерах применяются тахометрические преобразователи скорости, аналогичные преобразователям турбинных расходомеров. Шар (рис. 13.3, а) под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы, а под действием осевой составляющей скорости потока — к ограниченному кольцу, т. е. шару кроме сил вязкого трения жидкости необходимо преодолевать силы трения о поверхности трубы и ограничительного кольца. Это вызывает отставание окружной скорости шара  $v_{ш}$  от окружной скорости потока  $v$ , которое оценивается коэффициентом скольжения  $S = (v - v_{ш})/v$ , откуда  $v_{ш} = v(1 - S)$ .

Частота  $f$  импульсов тахометрического преобразователя связана со скоростью шара соотношением  $f = v_{ш}/(2\pi r)$ , где  $r$  — радиус вращения центра шара. Учитывая, что  $v = kQ_0$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, можно получить  $f = kQ_0(1 - S)/(2\pi r)$ . Таким образом, для обеспечения однозначной зависимости между  $f$  и объемным расходом  $Q_0$  надо иметь постоянство  $S$ . Этот коэффициент меньше всего изменяется в области значений чисел Рейнольдса от  $10^3$  до  $10^5$ , поэтому шариковые расходомеры проектируются для работы в этом диапазоне. Кроме того, для уменьшения скольжения масса шарика делается по возможности малой. Согласно стандарту шариковые расходомеры могут применяться для измерения расхода жидкостей с плотностью  $700 - 1400 \text{ кг/м}^3$ , вязкостью  $0,3 - 12 \text{ сСт}$   $[(0,3 + 12) \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}]$ . Из-за отсутствия опор у подвижного элемента расходомеры могут использоваться на жидкостях с твердыми включениями (ограниченной крупности) и агрессивных. Диапазон измерения шариковых расходомер-

ров обычно равен  $(0,2+1) Q_{в.п.}$  однако в диапазоне  $(0,2+0,3) Q_{в.п.}$  они обладают повышенной погрешностью по сравнению с диапазоном  $(0,3+1) Q_{в.п.}$  Приведенная погрешность обычно равна  $\pm 1,5\%$  в интервале  $(0,3+1) Q_{в.п.}$  и  $\pm 2,5\%$  в интервале  $(0,2+0,3) Q_{в.п.}$

На АЭС используются шариковые расходомеры ШТОРМ двух модификаций: ШТОРМ-32М (верхний предел измерения  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и ШТОРМ-8А (верхний предел измерения  $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Основная погрешность их  $\pm (1,5+2,5)\%$ .

Камерными называются тахометрические расходомеры и счетчики, имеющие один или несколько подвижных элементов, которые при движении отмеривают определенные объемы жидкости. Обычно эти подвижные элементы движутся непрерывно со скоростью, пропорциональной объемному расходу. В промышленности в подавляющем большинстве случаев применяются камерные счетчики. Достоинствами их является высокая точность измерения ( $0,5-1\%$  для жидкостей и  $1-1,5\%$  для газов), достаточно большой диапазон из-

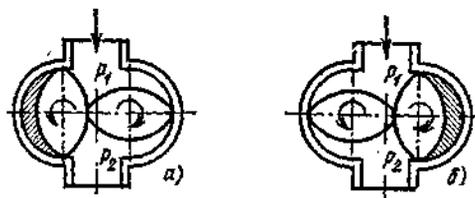


Рис. 13.4. Схема счетчика с овальными шестернями

мерения, слабое влияние вязкости измеряемой среды. Последнее обстоятельство позволяет применять камерные счетчики для жидкостей вязкостью до  $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  ( $300 \text{ сСт}$ ).

Одним из приборов камерного типа являются счетчики жидкости с овальными шестернями. Такие счетчики предназначены для измерения количества жидкости, имеющих вязкость от  $55 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  ( $0,55-300 \text{ сСт}$ ), температуру от  $-40$  до  $+120^\circ\text{C}$  и давление до  $64 \text{ кгс/м}^2$  в трубах диаметром до  $100 \text{ мм}$ . Такие счетчики имеют основную погрешность  $0,5\%$ . Схема преобразователя с овальными шестернями показана на рис. 13.4.

В положении шестерен по рис. 13.4, а под действием разности давлений  $p_1-p_2$  возникает вращающий момент, вращающий левую шестерню против часовой стрелки. Правая шестерня при этом будет ведомой и за счет зубчатого сцепления будет поворачиваться по часовой стрелке. Через поворот шестерни установятся в положение рис. 13.4, б. При этом вращающий момент будет создаваться на правой шестерне, левая становится ведомой. За полный оборот измерительные камеры (на рис. 13.4 заштрихованы) дважды наполняются и опорожняются, т. е. за один оборот объем пропускаемой жидкости равен четырем объемам одной измерительной камеры. На счетный механизм передается движе-

ние одной из шестерен посредством магнитной муфты или тахометрического дифференциально-трансформаторного преобразователя скорости. Сильное изменение вязкости жидкости увеличивает погрешность измерения счетчика.)

### 13.3. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости. Серийные электромагнитные расходомеры предназначены для измерения расхода жидкостей с электропроводностью не менее  $10^{-3} \text{ См/м}$  (соответствует электропроводности водопроводной воды). Имеются специальные расходомеры, позволяющие измерять расход жидкостей с электропроводностью до  $10^{-5} \text{ См/м}$ .

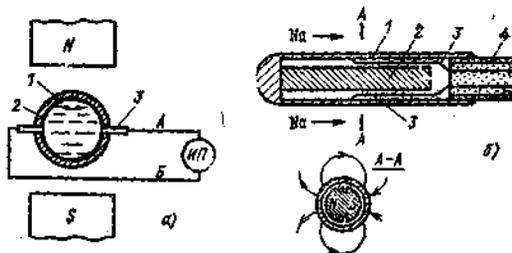


Рис. 13.5. Схема электромагнитного расходомера:

а — с внешним магнитом; б — с внутренним магнитом

На рис. 13.5, а показана принципиальная схема электромагнитного расходомера. Корпус 1 преобразователя, изготовленный из немагнитного материала и покрытый внутри электрической изоляцией 2 (резинной, эмальной, фторопластом и т. д.), расположен между полюсами магнита (на рис. 13.5, а изображен постоянный магнит). Через стенку трубы изолированно от нее по диаметру введены электроды 3, находящиеся в электрическом контакте с жидкостью. Силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через ось трубы и линию электродов.

В соответствии с законом электромагнитной индукции при осесимметричном профиле скоростей в жидкости между электродами будет наводиться ЭДС

$$E = BDv,$$

где  $B$  — индукция магнитного поля;  $v$  — средняя скорость жидкости;  $D$  — длина жидкостного проводника, равная диаметру трубы.

Учитывая, что  $Q_0 = \pi D^2/4$ , получаем

$$E = 4BQ_0v/(\pi D).$$

Отсюда следует, что ЭДС  $E$  прямо пропорциональна измеряемому объемному расходу. Измерение наведенной ЭДС осуществляется измерительным прибором ИП, к которому предъявляются жесткие требования по значению его входного сопротивления  $Z_{в}$ . Для обеспечения малого влияния внутреннего сопротивления преобразователя  $Z_{п}$  необходимо выполнение соотношения

$$Z_{в}/Z_{п} = 100 \div 500. \quad (13.5)$$

Внутреннее сопротивление преобразователя растет с уменьшением электропроводности жидкости, что вызывает необходимость увеличения  $Z_{в}$ , однако этому препятствует емкостное сопротивление соединительных проводов, включенных параллельно  $Z_{в}$ . Поэтому необходимость выполнения условия (13.5) накладывает ограничения на минимальную электропроводность измеряемой жидкости.

Применение постоянных магнитов в расходомерах позволяет облегчить борьбу с помехами от внешних электромагнитных полей, увеличить быстродействие прибора. Основным недостатком их использования является поляризация электродов: концентрация у положительного электрода отрицательных ионов, а у отрицательного положительных. Вследствие этого на границах электродов создаются ЭДС, которые в сумме образуют ЭДС поляризации, направленную против основной измеряемой ЭДС, что изменяет градуировочную характеристику прибора и делает невозможной его стабильную работу. Поэтому электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем не применяются для жидкостей с ионной проводимостью. Широкое распространение они получили для измерения расхода расплавленных металлов, в которых отсутствует явление поляризации. Типичная область применения таких расходомеров — ядерные энергетические установки с жидкометаллическим теплоносителем.

В этих установках обычно используются малогабаритные электромагнитные преобразователи, являющиеся по существу измерителями локальной скорости жидкого металла. При известном профиле потока по выходному сигналу такого преобразователя может быть вычислен расход. В качестве примера на рис. 13.5, б представлена схема электромагнитного преобразователя скорости с цилиндрическим магнитом. Основными элементами его являются обтекаемый корпус 1, магнит 2 в форме цилиндра и электроды 3. В простейшем случае электроды привариваются к внутренней поверхности корпуса в диаметрально противоположных точках и выводятся за корпус с помощью кабеля 4. При обтекании преобразователя жидким металлом между электродами появляется разность потенциалов, пропорциональная скорости металла.

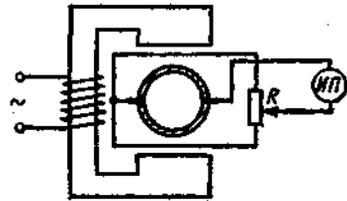


Рис. 13.6. Схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем

Для измерения расхода сред с ионной проводимостью применяются расходомеры с переменным магнитным полем, создаваемым электромагнитом (рис. 13.6). При синусоидально изменяющейся магнитной индукции, имеющей амплитудное значение  $B_m$  и частоту  $f$ , выражение для ЭДС имеет вид

$$E = 4B_m Q_0 v \sin(2\pi ft)/(\pi D). \quad (13.6)$$

При достаточно высокой частоте  $f$  поляризация электродов практически отсутствует, однако использование переменного магнитного поля имеет свои недостатки. Наиболее серьезным из них является появление паразитной трансформаторной ЭДС  $E_T$ . Эта ЭДС наводится рабочим магнитным полем  $B = B_m \sin(2\pi ft)$  в контуре (рис. 13.5, а) провод А — электрод — жидкость — электрод — провод Б — вход измерительного прибора ИП. В соответствии с законом электромагнитной индукции

$$E_T = - \frac{d\Phi}{dt} = - S \frac{dB}{dt} = - 2\pi f S B_m \times \cos(2\pi ft), \quad (13.7)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, пронизывающий контур;  $S$  — площадь проекции контура, пронизываемого магнитным полем, на плоскость, проходящую через ось трубы и линию электродов.

Сравнением (13.6) и (13.7) легко установить, что  $E$  и  $E_T$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , кроме того,  $E_T$  от расхода не зависит и существует даже при  $Q_0 = 0$ . Обе эти особенности используются для уменьшения влияния  $E_T$  на показания прибора. Значение  $E_T$  можно уменьшить, располагая провода  $A$  и  $B$  (рис. 13.5, а) в одной плоскости, параллельной силовым линиям магнитного поля. Обычно для ослабления влияния  $E_T$  используется схема рис. 13.6. В этой схеме от одного из электродов отходят два провода, симметрично охватывающих трубопровод с обеих сторон и замыкающихся на резистор  $R$ . Измерительный прибор подключается к движку этого резистора и по второму электроду. При нулевом расходе перемещением движка необходимо добиться минимального сигнала на входе измерительного прибора.

Оба описанных приема не устраняют трансформаторную ЭДС полностью. В современных расходомерах для полного устранения ее используется сдвиг по фазе на  $90^\circ$  между  $E$  и  $E_T$ . В этом случае измерительная схема содержит два канала, один из которых предназначен для измерения полезного сигнала, второй — для компенсации трансформаторной ЭДС. С помощью фазочувствительных детекторов по первому каналу пропускается только полезный сигнал, который затем измеряется показывающим или регистрирующим прибором. По второму каналу проходит только сигнал, пропорциональный  $E_T$ , который затем по цепи отрицательной обратной связи поступает на вход схемы и компенсирует трансформаторную ЭДС. Электромагнитные расходомеры имеют много достоинств. Они могут применяться на трубопроводах практически любых диаметров без ограничения верхнего предела по расходу. Их показания не зависят от вязкости и плотности среды. Шкала прибора линейная, диапазон измерения обычно равен  $(0,1 \div \pm 1) Q_{в.п.}$ . Преобразователь расхода

практически безынерционный, не имеет частей, выступающих внутрь трубы, и, таким образом, практически не создает потери давления. Влияние местных сопротивлений значительно меньше, чем у расходомеров с сужающими устройствами, поэтому требуемая длина прямых участков для них меньше (обычно считается достаточной длина прямых участков до преобразователя, равная  $10D$ ). В принципе возможно создание расходомера с таким профилем магнитного поля, при котором необходимость в прямых участках до и после преобразователя отпадает вообще.

Электромагнитные расходомеры могут быть использованы в ряде случаев, когда применение расходомеров других типов затруднено или невозможно вовсе: при измерении расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп, измерении расхода жидких металлов.

К числу недостатков электромагнитных расходомеров следует отнести требования к минимальному значению электропроводности измеряемой среды, что сужает круг использования таких расходомеров. Другим недостатком расходомеров является сложность измерительной схемы, подверженность ее влиянию многих помех, что затрудняет изготовление расходомеров класса более 1 и усложняет эксплуатацию. Промышленностью выпускаются несколько типов индукционных расходомеров классов 1 и 1,5. Наиболее точным являются расходомеры типа ИР-51 класса 1, имеющие диаметры условного прохода 10—300 мм и верхние пределы измерения  $0,32—2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

#### 13.4. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковой метод измерения расхода основан на зависимости скорости ультразвука относительно трубы от скорости потока.

Основные трудности использования ультразвукового метода связаны с тем, что, во-первых, скорость звука в среде зависит от ее физико-химических свойств, температуры, давления и, во-вторых, она значительно больше скорости среды, так что действительная скорость ультразвука в движущейся среде мало отличается от скорости в среде неподвижной. Эти об-

стоятельства обуславливают необходимость применения специальных методов компенсации погрешностей, что сильно усложняет измерительные схемы.

Следует отметить также, что ультразвуковые расходомеры применяются главным образом для измерения расхода жидкостей из-за малой интенсивности ультразвуковой волны и большого коэффициента поглощения ультразвука в газах. Основными элементами преобразователей ультразвуковых расходомеров являются излучатели и приемники ультразвуковых колебаний. Ультразвуковые колебания, попадающие на приемник, вызывают его механическую деформацию в виде перио-

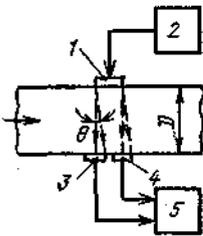


Рис. 13.7. Ультразвуковой уровнемер с излучением, перпендикулярным потоку

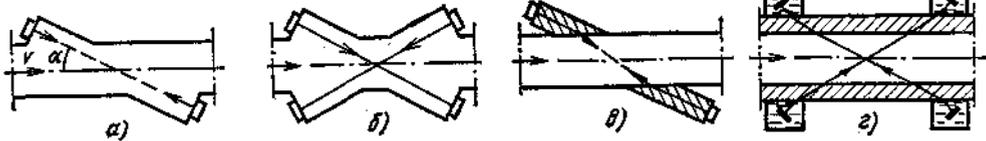


Рис. 13.8. Схемы преобразователей ультразвуковых расходомеров с излучением по потоку: а, в — одноканальные; б, г — двухканальные

дических сжатий и растяжений, которые преобразуются в переменное электрическое напряжение. Ультразвуковые расходомеры можно подразделить на две группы.

К первой группе относятся расходомеры с излучением, перпендикулярным потоку (рис. 13.7): пьезоэлемент 1, возбуждаемый генератором 2, создает ультразвуковые колебания, направленные перпендикулярно оси трубы. По мере увеличения средней скорости потока  $v_{cp}$  ультразвуковой луч все более отклоняется по направлению скорости  $v$ . Угол отклонения луча  $\theta$  будет определяться выражением

$$\theta = \arcsin(v_{cp}/c) \approx v_{cp}/c,$$

где  $c$  — скорость ультразвука в неподвижной среде.

Линейное отклонение луча у приемных пьезоэлементов 3 и 4  $\delta = D \operatorname{tg} \theta \approx$

$\approx D(v_{cp}/c)$ . С увеличением  $v_{cp}$  количество энергии, поступающей на пьезоэлемент 3, уменьшается, а поступающей на пьезоэлемент 4, растет и, таким образом, разностный сигнал, поступающий на вход усилителя 5, увеличивается. Расходомеры с такой схемой просты по устройству, но обладают ограниченной точностью из-за малого отклонения луча. Поэтому наибольшее распространение получили расходомеры второй группы, основанные на измерении скорости прохождения ультразвуковых импульсов между излучателем и приемником в направлении потока контролируемой среды и против него (расходомеры с излучением по потоку). При этом обычно векторы  $v_{cp}$  и  $c$  направлены под углом друг к другу, причем чем меньше  $\alpha$ , тем чувствительнее расходомер.

Расходомеры могут выполняться по одноканальной (рис. 13.8, а, в) или двухканальной (рис. 13.8, б, г) схеме. В одноканальной схеме каждый пьезоэлемент работает попеременно в режи-

ме излучателя и в режиме приемника, что обеспечивается системой переключателей. В двухканальной схеме каждый пьезоэлемент работает только в одном определенном режиме. Очевидно, что двухканальные схемы проще одноканальных (нет сложных схем переключения), но точность их меньше, вследствие возможной акустической несимметрии обоих каналов.

Для чистых сред пьезоэлементы могут устанавливаться в специальных карманах (рис. 13.8, а, б). Для загрязненных сред применение карманов нежелательно. В этом случае либо карманы заполняются твердым материалом — звукопроводом (рис. 13.8, в), либо применяются излучатели и приемники, не требующие нарушения целостности трубы (рис. 13.8, г). В последних двух схемах ультразвуковой луч преломляется на границах сред,

что в ряде схем используется для компенсации влияния изменений температуры среды на показания.

Принцип действия расходомеров с излучением по потоку заключается в использовании разницы времени прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него.

Действительно, если обозначить расстояние между излучателем и приемником через  $L$  и угол между векторами скоростей потока  $\bar{v}_{cp}$  и ультразвука  $\bar{c}$  через  $\alpha$ , то время распространения импульса по потоку

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v_L \cos \alpha} \approx \frac{L}{c} \left( 1 - \frac{v_L}{c} \cos \alpha \right),$$

где  $v_L$  — скорость среды, усредненная по длине пути луча от излучателя до приемника.

Время прохождения импульса против потока

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v_L \cos \alpha} \approx \frac{L}{c} \left( 1 + \frac{v_L}{c} \cos \alpha \right).$$

Следовательно, разность времен прохождения импульсов

$$\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1 = 2L \frac{\cos \alpha}{c^2} v_L. \quad (13.8)$$

Таким образом, показания ультразвуковых расходомеров зависят от скорости потока  $v_L$ , усредненной по ходу луча, а не по диаметру трубы, что является характерной особенностью расходомеров с излучением по потоку. В то же время для определения объемного расхода требуется измерение скорости  $v_{cp}$ , усредненной по диаметру трубы. Для трубопроводов круглого сечения даже для осесимметричных потоков  $v_{cp} \neq v_L$  и соотношение между ними зависит от эпюры скоростей потока. Это обстоятельство является недостатком ультразвуковых расходомеров, определяющим наиболее существенную составляющую методической погрешности.

В общем случае  $v_L$  и  $v_{cp}$  связаны соотношением

$$v_L = kv_{cp}. \quad (13.9)$$

При установившемся турбулентном движении и осесимметричном потоке  $k$  зависит от числа  $Re$ , так как с изменением  $Re$  изменяется характер распределения скоростей. Это является причиной принципиальной нелинейности статических характеристик ультра-

звуковых расходомеров при их индивидуальной градуировке.

По методу определения  $\Delta \tau$  ультразвуковые расходомеры подразделяются на время-импульсные, частотные и фазовые.

Во время-импульсных расходомерах периодически производится измерение разности  $\Delta \tau$  времен прохождения очень коротких импульсов длительностью 0,1—0,2 мкс, по которой затем в соответствии с (13.8) и (13.9) определяется объемный расход  $Q_0$ .

Измеряемое время  $\Delta \tau$  очень мало ( $10^{-6}$ — $10^{-7}$  с) даже при максимальном расходе, причем измерять его необходимо с погрешностью  $10^{-3}$ — $10^{-9}$  с. Это вызывает необходимость применения сложных электронных схем. Кроме того, показания таких расходомеров зависят от изменения  $c$ . Эти обстоятельства объясняют редкое применение таких расходомеров по сравнению с другими типами.

В частотных расходомерах каждый последующий импульс посылается излучателем только после достижения предыдущим импульсом приемного пьезоэлемента. Очевидно, что если время между импульсами равно  $\tau$ , то частота следования их  $f = 1/\tau$ . Разность частот следования импульсов по потоку и против него определяется дифференциальной схемой и связана со скоростью и объемным расходом. Показания частотных расходомеров не зависят от скорости распространения ультразвука в неподвижной среде, а следовательно, и от физико-химических свойств среды. Это является важным достоинством частотных расходомеров.

В фазовых расходомерах измеряется разность фаз  $\Delta \phi$  ультразвуковых колебаний частотой  $f$ , распространяющихся по потоку и против него. Недостатком этих расходомеров является зависимость показаний от изменения  $c$ .

Приведенное выше описание принципа действия ультразвуковых расходомеров выявляет основные их недостатки. Наиболее серьезным из них является зависимость показаний от профиля скоростей, который изменяется с изменением расхода. Погрешность увеличивается при искаженном профиле скоростей из-за наличия, например, вблизи преобразователя местных сопротивлений. Отсюда вытекает

необходимость прямых участков трубы до и после расходомеров.

Другим серьезным недостатком является влияние на показания прибора изменения физико-химических свойств контролируемой среды и ее температуры, влияющих на скорость ультразвука  $c$ .

Ультразвуковые расходомеры являются перспективными для многих отраслей промышленности в силу следующих достоинств:

1) возможности использования на трубопроводах различных диаметров (от 10 мм и выше);

2) возможности бесконтактного измерения расхода любых сред, в том числе и неэлектропроводных.

Основная погрешность ультразвуковых расходомеров без коррекций на скорость звука находится в пределах  $\pm(2 \div 4)\%$ . Одноканальные расходомеры с коррекцией на скорость звука позволяют снизить эту погрешность до  $\pm 1\%$ . В отдельных разработках основная погрешность не превышает  $\pm 0,3\%$ .

### 13.5. Тепломеры

Измерение расхода и количества теплоты играет важную роль при автоматизации систем теплоснабжения. Прибор, измеряющий количество теплоты, перенесенной теплоносителем в единицу времени, называется тепломером.

Прибор, измеряющий количество теплоты, перенесенной теплоносителем за некоторый промежуток времени, называется теплосчетчиком.

В теплоэнергетике может измеряться либо расход теплоты с потоком теплоносителя (тепловая мощность потока), либо количество теплоты, вырабатываемой или потребляемой различными установками. В первом случае расход  $q$  определяется через массовый расход  $Q_m$  и энтальпию  $i$  потока в соответствии с известным выражением

$$q = Q_m i. \quad (13.10)$$

Тепломеры, реализующие выражение (13.10), называются тепломерами потока.

Во втором случае расход теплоты может быть определен как разность тепловых мощностей на входе и выходе установки:

$$q = (Q_m i)_{\text{вх}} - (Q_m i)_{\text{вых}}. \quad (13.11)$$

Тепломеры, реализующие это выражение, называются разностными.

При равенстве расхода теплоносителя на входе и выходе последнее выражение упрощается:

$$q = Q_m (i_{\text{вх}} - i_{\text{вых}}), \quad (13.12)$$

где  $i_{\text{вх}}$ ,  $i_{\text{вых}}$  — энтальпия теплоносителя на входе и выходе теплообменника.

Таким образом, для измерения расхода теплоты должно производиться непрерывное

измерение массового расхода и энтальпии с последующим вычислением результата по (13.10) — (13.12). Энтальпия теплоносителя рассчитывается по приближенным формулам по давлению и температуре. В общем случае энтальпия вещества является сложной функцией давления  $p$  и температуры  $t$ , поэтому обычно используются различные аппроксимирующие функции (линейные, гиперболические и т. д.). Выбор вида функции определяется требуемой точностью измерения энтальпии, диапазонами изменения температуры и давления, сложностью вычислительной схемы.

Например, для пара может быть использовано выражение

$$i = (k_1 + k_2 t) / (k_3 + k_4 p), \quad (13.13)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  — постоянные коэффициенты.

Для параметров воды в теплофикационных системах (давление до 1 МПа (10 кгс/см<sup>2</sup>) и  $t < 150^\circ\text{C}$ ) влиянием давления на энтальпию можно пренебречь, и в этом случае можно использовать упрощенное выражение

$$i = i_0 + k_5 \Delta t,$$

где  $i_0$  — энтальпия при расчетной температуре;  $\Delta t$  — отклонение температуры от расчетной;  $k_5$  — коэффициент.

Можно также использовать выражение, полученное из (13.13) в предположении  $p = \text{const}$ :

$$i = k_6 + k_7 t, \quad (13.14)$$

где  $k_6, k_7$  — постоянные коэффициенты;  $t$  — температура воды.

Применяемые в промышленности расходомеры обычно измеряют объемный расход (в принципе это измерители скорости потока, которая однозначно связана с объемным расходом через площадь сечения трубопровода). Переход от объемного расхода к массовому, что необходимо для использования в выражениях (13.10) — (13.12), осуществляется через плотность среды  $\rho$  посредством выражения  $Q_m = Q_v \rho$ . При изменении  $p$  и  $t$  среды ее плотность изменяется, что вызовет изменение в показаниях тепломера, если они автоматически не корректируются. Изменение плотности теплоносителя от температуры и давления также может быть учтено с помощью аппроксимирующих функций по текущему значению параметров среды. Например, для пара может быть использована формула

$$\rho = (k_1 + k_2 p) / (k_3 + k_4 t)$$

и для жидкостей

$$\rho = 1 / (k_5 + k_6 t), \quad (13.15)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  — постоянные коэффициенты.

Часто при разработке тепломеров используются не отдельные функции, аппроксимирующие изменение энтальпии (13.13) и (13.14) и плотности (13.15), а функции, аппроксимирующие совокупное изменение плотности и энтальпии (обобщенные функции). Обобщенные аппроксимирующие функции также могут быть различного вида (линейные, дробные и т. д.). Например, для жидкого теплоносителя, расход которого измеряется по перепаду давлений на сужающем устройстве, выражение для теплового потока может быть записано в виде

$$q = \alpha F_0 \sqrt{2\rho \Delta p} i.$$

В этом выражении от температуры и давления среды зависят  $\rho$  и  $i$  (изменением пло-

шадн проходного отверстия  $F_0$  сужающего устройства перенебрегаем).

Совокупную зависимость  $l$  и  $\rho$  от температуры без большой погрешности можно аппроксимировать линейной функцией. При этом последнюю зависимость можно переписать в виде

$$q = \alpha F_0 \sqrt{\Delta p} (k_1 + k_2 t). \quad (13.16)$$

Выражение (13.16) реализуется в вычислительных устройствах по сигналам дифманометра и термометра. Конкретная схема таких устройств зависит от вида выходных сигналов дифманометра и термометра.

В тепломерах пара должно быть учтено не только изменение от параметров среды плотности и энтальпии, но также и поправочного множителя  $\epsilon$  на расширение среды. В этом случае может быть использована обобщенная функция, например в следующем виде:

$$q = \alpha \epsilon_{ср} F_0 \sqrt{\Delta p} (k_3 + k_4 p) / (k_5 + k_6 t),$$

где  $k_3-k_6$  — постоянные коэффициенты;  $\epsilon_{ср}$  — поправочный множитель, рассчитанный для номинальных параметров; в схему таких тепломеров должен вводиться сигнал от манометра.

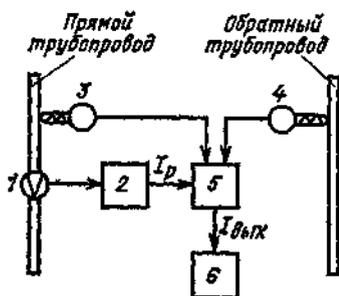


Рис. 13.9. Функциональная схема теплосчетчика

## Глава четырнадцатая ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

Измерение уровня жидкостей играет важную роль при автоматизации технологических процессов, особенно если поддержание уровня связано с условиями безопасной работы оборудования. Уровнемеры могут использоваться либо для контроля за отклонением уровня от номинального и в этом случае они имеют двустороннюю шкалу, либо для определения количества жидкости (в сочетании с известными размерами емкости) и в этом случае они имеют одностороннюю шкалу. В зависимости от условий измерения, характера контролируемой среды используются различные методы измерения уровня. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, уровень жидкости можно изме-

При равенстве прямого и обратного потоков теплоносителя может быть построен разностный тепломер, использующий выражение (13.12). Примером такого тепломера является разностный теплосчетчик ТС-20, оснащенный индукционным расходомером, в нем реализуется выражение

$$q = Q_0 \rho (i_{пр} - i_{обр}), \quad (13.17)$$

где  $i_{пр}$  и  $i_{обр}$  — энтальпии воды в прямом и обратном трубопроводах.

Функциональная схема теплосчетчика изображена на рис. 13.9. Расход воды измеряется электромагнитным расходомером, состоящим из преобразователя расхода  $I$  и электронного блока 2, выходной ток которого  $I_p$  пропорционален расходу:

$$I_p = k Q_0, \quad Q_0 = I_p / k. \quad (13.18)$$

Энтальпии  $i_{пр}$ ,  $i_{обр}$  и плотности воды  $\rho$  вычисляются по температурам прямой и обратной воды, которые измеряются термометрами сопротивления 3 и 4.

Для упрощения в выражениях, аппроксимирующих  $i_{пр}-i_{обр}$  и  $\rho$ , используются не температуры, а сопротивления термометров, соответствующих этим температурам:

$$(i_{пр} - i_{обр}) = a R_{tпр} - (R_{tобр} + b); \quad (13.19)$$

$$\rho = c / (R_{tпр} + d), \quad (13.20)$$

где  $R_{tпр}$ ,  $R_{tобр}$  — сопротивления термометров, измеряющих температуру в прямом и обратном трубопроводах;  $a-d$  — постоянные коэффициенты.

При этом функция, аппроксимирующая (13.17), будет иметь вид

$$q = \frac{1}{k} [a R_{tпр} - (R_{tобр} + b)] I_p c / (R_{tпр} + d). \quad (13.21)$$

Устройство 5 вычисляет (13.21) по сигналам расходомера воды и термометров сопротивления, результат вычисления фиксируется измерительным прибором 6.

урья уровнемерами с визуальным отсчетом (указательных стекол). При необходимости дистанционного измерения уровня используются более сложные уровнемеры: гидростатические (дифманометрические и барботажные), буйковые и поплавковые, емкостные, индуктивные, радиоизотопные, волновые, акустические, термокондуктометрические. Некоторые разновидности этих уровнемеров рассматриваются ниже.

### 14.1. Уровнемеры с визуальным отсчетом

Такие уровнемеры основаны на визуальном измерении высоты уровня жидкости. При невысоких давлениях

среды высота уровня измеряется в стеклянной трубке (указательном стекле), сообщающейся с жидкостным и газовым пространствами контролируемого резервуара (рис. 14.1). При повышенных давлениях применяются плоские стекла, на поверхности которых со стороны жидкости нанесены вертикальные граненые канавки. Из условий прочности не рекомендуется применять указательные стекла длиной более 0,5 м, поэтому при большом диапазоне изменения уровня устанавливается несколько стекол в шахматном порядке таким образом, чтобы их диапазоны измерения перекрывались.

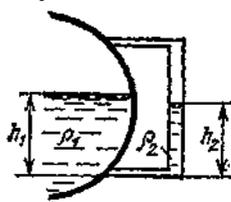


Рис. 14.1. Схема уравнивателя с визуальным отсчетом

Основным источником дополнительной погрешности таких уравнивателей является разница плотностей жидкостей в контролируемом резервуаре и в стекле, вызываемая различием температур (особенно если жидкость в резервуаре находится при высокой температуре, а указательное стекло находится на значительном удалении). Различие плотностей приводит к различию уровней в резервуаре и указательном стекле (уровень в стекле иногда называют «весовым» уровнем); при этом абсолютная погрешность измерения может быть вычислена по формуле

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 (1 - \rho_2 / \rho_1),$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности жидкостей в резервуаре и указательном стекле.

Погрешность может достигать существенных значений, поэтому с целью ее уменьшения необходима либо тепловая изоляция уравнивателя, либо продувка его жидкостью из резервуара перед отсчетом.

#### 14.2. Гидростатические уравниватели

В этих уравнивателях измерение уровня  $H$  жидкости постоянной плотности  $\rho$  сводится к измерению гидростатического давления  $p$ , создаваемого жидкостью, причем

$$p = H \rho g. \quad (14.1)$$

Гидростатический уравниватель, в котором гидростатическое давление жидкости измеряется дифманометром, называется дифманометрическим.

Гидростатический уравниватель, в котором гидростатическое давление жидкости преобразуется в давление воздуха, называется пневмоуравнивателем. Разновидностью пневмоуравнивателя является барботажный уравниватель, в котором воздух, подаваемый от постороннего источника, барботирует через слой жидкости.

Дифманометрические уравниватели. Схема подключения дифманометра к открытому резервуару, находящемуся под атмосферным давлением, изображена на рис. 14.2. Обе импульсные

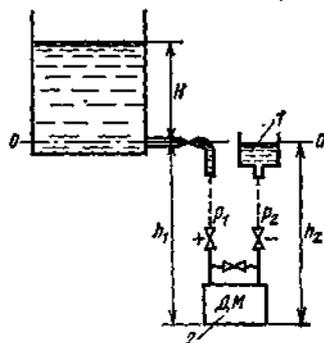


Рис. 14.2. Схема подключения дифманометра при измерении уровня в открытом резервуаре

трубки дифманометра заполняются контролируемой жидкостью (если она не агрессивна). Дифманометр измеряет разность давлений  $p_1$  и  $p_2$ , действующих на его чувствительный элемент. В соответствии с (14.1) можно записать выражения для этих давлений:  $p_1 = (H + h_1) \rho_1 g$ ;  $p_2 = h_2 \rho_2 g$ . Таким образом, дифманометр будет измерять перепад давлений, выражающийся через контролируемый уровень  $H$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (H + h_1) \rho_1 g - h_2 \rho_2 g. \quad (14.2)$$

Если плотности  $\rho_1$  и  $\rho_2$  жидкости в обеих импульсных трубках одинаковы и если  $h_1 = h_2$ , то

$$\Delta p = H \rho g. \quad (14.3)$$

где  $\rho = \rho_1 = \rho_2$ .

Из (14.2) и (14.3) видно, что дифманометрический уравниватель измеряет «весовой» уровень, т. е. его показания будут изменяться при изменении плотности контролируемой среды. Погрешность в показаниях появится так-

же, если имеется разность плотностей  $\rho_1$  и  $\rho_2$  в импульсных трубках (для исключения этой погрешности импульсные трубки прокладываются рядом). Наконец, формула (14.3) справедлива только в том случае, если уровень жидкости в «минусовой» импульсной трубке (обозначенной знаком «-») будет неизменным при изменении контролируемого уровня  $H$ .

Для обеспечения этого на этой импульсной трубке устанавливается уравнительный сосуд. Сосуд и импульсная трубка заливаются жидкостью до уровня 00, принятого за на-

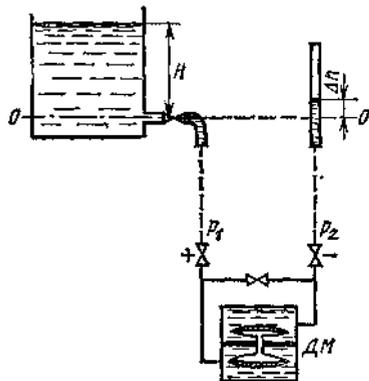


Рис. 14.3. Схема образования погрешности при отсутствии уравнительного сосуда

чальную отметку шкалы уровнемера. Необходимость установки уравнительного сосуда легко пояснить по рис. 14.3, на котором изображена схема уровнемера без уравнительного сосуда. Предположим, что при нулевом значении измеряемого уровня  $H$  уровень жидкости в минусовой импульсной трубке соответствует линии 00 (очевидно, что убрать минусовую импульсную трубку и просто соединить минусовую камеру дифманометра с атмосферой нецелесообразно, так как в этом случае при  $H=0$  на дифманометр будет действовать перепад  $\Delta p = \rho_1 g$ , т. е. диапазон измерения дифманометра будет использован неполностью).

При увеличении  $H$  будет увеличиваться давление  $p_1$  в плюсовой (нижней) камере дифманометра, что вызовет сжатие плюсовой (нижней на рис. 14.3) мембранной коробки. В соответствии с принципом действия дифманометра это приведет к расширению и увеличению объема мембранной коробки в минусовой (верхней на рис.

14.3) камере (изменение объема коробок на рис. 14.3 заштриховано). Очевидно, что такой же объем жидкости будет вытолкнут из верхней камеры в импульсную линию, что приведет к увеличению уровня в ней на  $\Delta h$ .

При этом перепад, действующий на дифманометр,  $\Delta p' = (H - \Delta h) \rho g$ . Поскольку  $\Delta p' < \Delta p$  (14.3), показания уровнемера будут заниженными, причем абсолютная погрешность измерения увеличивается с увеличением контролируемого уровня  $H$ .

Установкой уравнительного сосуда большого диаметра можно уменьшить  $\Delta h$ , так как один и тот же объ-

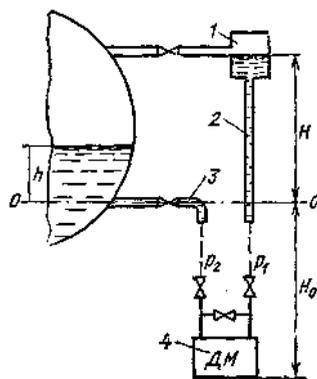


Рис. 14.4. Схема уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом

ем жидкости, вытолкнутой из минусовой камеры дифманометра, в широком сосуде вызовет меньшее изменение уровня, чем в тонкой импульсной трубке.

В случае измерения уровня агрессивной жидкости на импульсных линиях устанавливаются разделительные устройства. При этом дифманометр и импульсные трубки ниже разделительных устройств заполняются неагрессивной жидкостью.

Простейшей схемой измерения уровня жидкости в резервуаре под давлением является представленная на рис. 14.4 схема измерения уровня в барабане котла с использованием однокамерного уравнительного сосуда.

Уравнительный сосуд 1 подсоединяется к паровому пространству, причем и сосуд и труба 2 тепловой изоляцией не покрываются. Трубка 3 непосредственно подключается к водяному пространству барабана. Выражение для разности давлений  $\Delta p$ , измеряемой дифманометром 4, может

быть легко получено через давления, создаваемые в плюсовой  $p_1$  и минусовой  $p_2$  камерах дифманометра:

$$p_1 = (H + H_0) \rho_B g,$$

где  $\rho_B$  — плотность воды в уравнительном сосуде и импульсной трубке 2.

Давление  $p_2$  представляет собой сумму гидростатических давлений столба жидкости  $h$  в барабане, имеющего плотность  $\rho'$ , столба жидкости  $H_0$  в импульсной трубке 3 плотностью  $\rho_B$  и столба пара в барабане высотой  $H-h$  и плотностью  $\rho''$ :

$$p_2 = H_0 \rho_B g + h \rho' g + (H - h) \rho'' g.$$

Таким образом, перепад  $\Delta p$ , действующий на дифманометр, будет определяться выражением

$$\Delta p = p_1 - p_2 = [H \rho_B - h \rho' - (H - h) \rho''] g = [H (\rho_B - \rho'') - h (\rho' - \rho'')] g \quad (14.4)$$

Из (14.4) легко заметить, что показания уровнемера зависят не только от текущего значения  $H$ , но и от плотностей воды  $\rho'$  и пара  $\rho''$ , которые в свою очередь зависят от температуры и давления среды в барабане. Поэтому расчет шкалы дифманометров-уровнемеров производят на рабочее (номинальное) давление в барабане. Кроме того, на результат измерения будет оказывать влияние изменение плотности воды  $\rho_B$  в импульсной трубке, так как при этом изменяется гидростатическое давление столба высотой  $H$  в импульсной трубке 2, в то время как давление  $p_1$  должно оставаться постоянным. Это может происходить при изменении температуры окружающей среды или температуры среды в барабане.

На рис. 14.5 представлены графики, иллюстрирующие изменение показаний уровнемера при отклонении давления пара в барабане от расчетного значения 16 МПа при температуре воды в трубке 2 (рис. 14.4), равной 20°C.

Уровнемер измеряет отклонение уровня в барабане от номинального в интервале  $\pm 315$  мм, следовательно, номинальный уровень на рис. 14.5 соответствует отметке 0. Из графика видно, что изменение параметров среды в барабане существенно искажает показания уровнемера, причем эта погрешность зависит от текущего значения уровня. Минимальное влияние от-

клонения параметров уровнемер будет испытывать при уровне, соответствующем точке пересечения линий, но этот уровень ниже номинального.

Очевидно, что отклонение температуры окружающей среды от расчетной (20°C) вызывает изменение  $\rho_B$  и показаний уровнемера. Уменьшение влияния изменения  $\rho_B$  на показания уровнемера может быть достигнуто использованием двухкамерного урав-

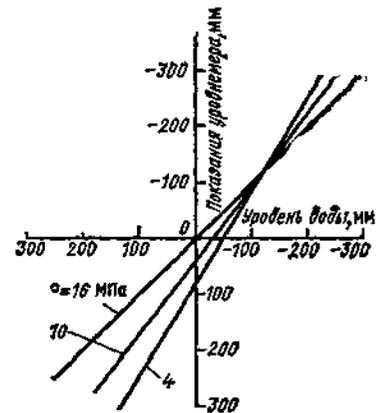


Рис. 14.5. Изменение показаний уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане

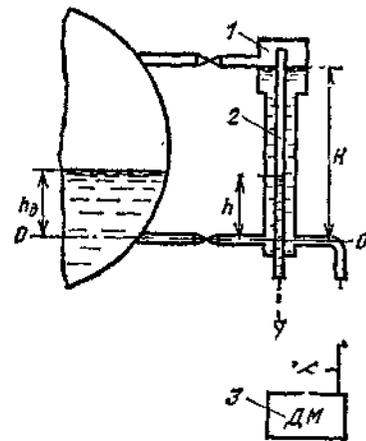


Рис. 14.6. Схема уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом

нительного сосуда (рис. 14.6). Внешняя поверхность уравнительного сосуда 1 покрыта тепловой изоляцией, для того чтобы плотность воды в нем и во внутренней трубке 2, соединенной с водяным пространством барабана, была равна плотности воды в барабане, что обусловит равенство уровня воды  $h$  в трубке 2 и действительного

уровня воды в барабане  $h_d$ . Для такой схемы выражение для перепада давления, действующего на дифманометр 3, имеет вид

$$\Delta p = H\rho'g - [h\rho'g + (H-h)\rho''g] = (H-h)(\rho' - \rho'')g, \quad (14.5)$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  — плотности воды и пара в барабане.

Таким образом, и при использовании такой схемы показания уровне-

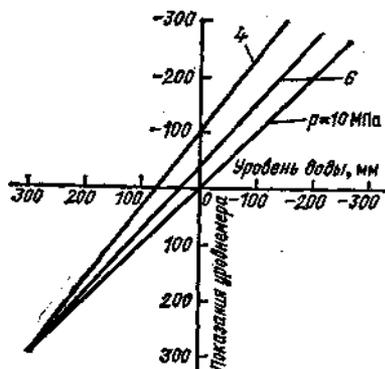


Рис. 14.7. Изменение показаний уровнемера с двухкамерным уравнильным сосудом при изменении давления в барабане

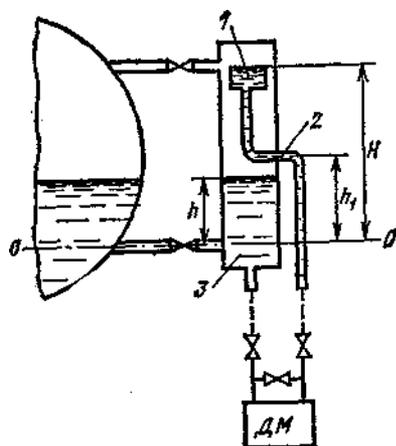


Рис. 14.8. Схема уровнемера с комбинированным уравнильным сосудом

ра зависят от разности плотностей воды и пара  $\rho' - \rho''$ , которая определяется режимом работы установки.

На рис. 14.7 представлены графики, характеризующие изменение показаний такого уровнемера при отклонении давления в барабане от расчетного давления 10 МПа. Погрешность уровнемера с двухкамерным уравнильным сосудом, как и с одно-

камерным, зависит от текущего значения уровня. При определенном его значении, соответствующем точке пересечения линий на рис. 14.7, изменения давления не сказываются на показаниях уровнемера. Это — значение уровня выше номинального (для схемы рис. 14.4 оно было ниже номинального). В эксплуатации удобно использовать уровнемер, имеющий минимальную погрешность от изменения давления при номинальном уровне в барабане (т. е. уровне, соответствующем точке 0 на рис. 14.5, 14.7). Для такого уровнемера линии, характеризующие зависимость показаний от уровня при различных давлениях (линии на рис. 14.5; 14.7), должны пересекаться в начале координат.

Такие характеристики имеют уровнемеры с комбинированными уравнильными сосудами (рис. 14.8).

Этот сосуд отличается от двухкамерного сосуда тем, что импульсная трубка 2 от уравнильного сосуда 1 проходит не через весь сосуд 3, а выведена сбоку; таким образом, столб воды высотой  $h_1$  находится в холодном состоянии, так как трубка 2 не изолируется. Внешняя поверхность самого сосуда покрыта тепловой изоляцией. В этом случае перепад давления  $\Delta p$ , действующий на дифманометр, определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta p &= [(H - h_1)\rho' + h_1\rho_w]g - \\ &\quad - [h\rho' + (H - h)\rho'']g = \\ &= [(H - h)(\rho' - \rho'') + h_1(\rho_w - \rho'')]g, \end{aligned} \quad (14.6)$$

где  $\rho_w$  — плотность воды в трубке 2 на участке  $h_1$ .

Из (14.6) видно, что на зависимость  $\Delta p = f(H)$  влияет значение  $h_1$ .

Рекомендуется значение  $h_1$  выбирать из соотношения

$$h_1 = 1,222(H - h_{cp}),$$

где  $h_{cp}$  — номинальный уровень в барабане относительно нулевой линии 00 (рис. 14.8).

На рис. 14.9  $h_{cp}$  соответствует отметке шкалы 0.

На рис. 14.9 приведены графики зависимости показаний уровнемера с комбинированным уравнильным сосудом от значений уровня при расчетном давлении в барабане 16 МПа и при давлении 10 и 4 МПа. Как следует из графиков, минимальное влияние

изменение давления оказывает практически при номинальном уровне.

Следует отметить, что в схемах с двухкамерными уравнительными сосудами важное значение имеет обеспечение равенства температур в барабане и сосуде. При любом изменении температуры в сосуде относительно барабана появится дополнительная погрешность, так как будет нарушено основное требование к уравнительным

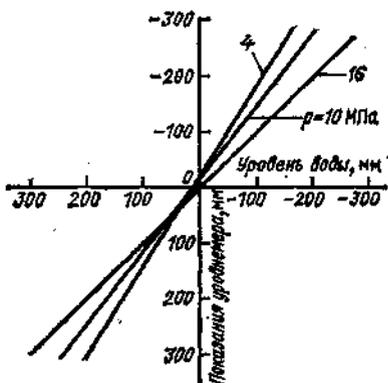


Рис. 14.9. Изменение показаний уровнемера с комбинированным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане

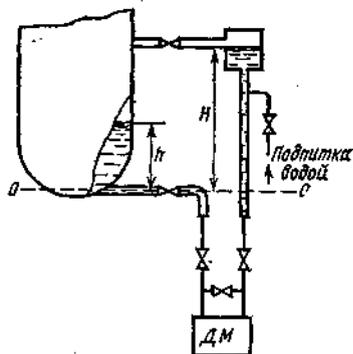


Рис. 14.10. Схема измерения уровня конденсата греющего пара в подогревателях

сосудам — стабилизация гидростатического давления в одной из камер дифманометра.

Все три рассмотренные схемы уровнемеров не обеспечивают независимости показаний от изменения давления при любом текущем значении контролируемого уровня.

Все рассмотренные схемы подключения дифманометров-уровнемеров могут использоваться для измерения уровня жидкостей в объектах электростанций или промышленных предпри-

ятий. Конкретная схема измерения определяется условиями работы объекта и необходимой точностью измерения уровня. Так, при измерении уровня в подогревателях питательной или сетевой воды электростанций обычно используются однокамерные уравнительные сосуды (рис. 14.10). Перепад давления, действующий на дифманометр, определяется выражением

$$\Delta p = [H \rho_v - h \rho' - (H - h) \rho''] g,$$

или

$$\Delta p = [H(\rho_v - \rho'') - h(\rho' - \rho'')] g,$$

где  $\rho_v$ ,  $\rho'$  и  $\rho''$  — плотности воды в плюсовой импульсной трубке, конденсата и пара.

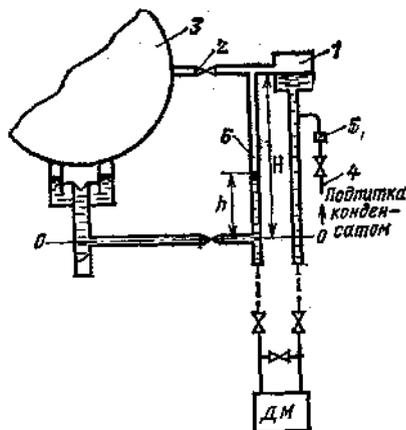


Рис. 14.11. Схема измерения уровня воды в конденсаторе турбины

Схема измерения уровня в конденсаторе турбины представлена на рис. 14.11. В схеме показан однокамерный уравнительный сосуд 1, посредством трубки 2 соединенный с паровым пространством конденсатора 3. Для того чтобы испарение воды в сосуде 1 не приводило к уменьшению уровня, а также для стабилизации температуры воды в плюсовой импульсной трубке в нее непрерывно по трубе 4 через ограничительную диафрагму 5 подается конденсат из напорной линии конденсатного насоса. Избыток конденсата стекает по напорной линии 2 в конденсатор. Трубка 6 присоединена к всасывающей трубе конденсатного насоса, уровень  $h_1$  в этой трубке соответствует измеряемому уровню.

Перепад  $\Delta p$ , действующий на дифманометр, определяется выражением  $\Delta p = [H\rho' - h\rho'' - (H-h)\rho'']g = (H-h)(\rho' - \rho'')g$ . Поскольку при давлении в конденсаторе  $\rho' \gg \rho''$  выражение для перепада давления упрощается:  $\Delta p = (H-h)\rho'g$ . Дифманометры в качестве измерителей уровня нашли применение также и в криогенной технике для измерения уровня низкокипящих сред. Особенностью подключения дифманометров-уровнемеров к емкостям является отсутствие уравнительных сосудов (рис. 14.12). Импульсные трубки выводятся из газовой полости и части, заполненной жидкостью, причем последняя выводится горизонтально для исключения возможного влияния столба жидкост-

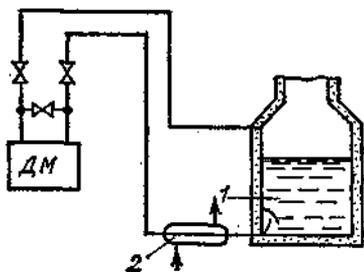


Рис. 14.12. Схема измерения уровня низкокипящих сред дифманометром

ти в трубке. Если нижняя импульсная трубка будет заполнена жидкостью, то при ее испарении порциями возможно колебание давления в измерительной схеме. Во избежание этого отбор давления осуществляется из специального колпачкового устройства 1. В этом случае жидкость (за счет притока теплоты по импульсной трубке) испаряется в полость под колпачком, что исключает пульсацию давления.

В тех случаях, когда разность температур между контролируемой средой и средой, окружающей резервуар, меньше  $50^\circ\text{C}$ , для уменьшения пульсации давления в плюсовой импульсной трубке на ней вблизи резервуара устанавливается тепловая рубашка 2, в которую подается теплая среда. Этим обеспечивается надежное испарение жидкости в пространство под колпачком.

Метод измерения уровня дифманометрами обладает рядом достоинств. Такие уровнемеры отличаются механической прочностью, простотой монтажа, надежностью. Но им присущ

один существенный недостаток: чувствительный элемент дифманометров находится в непосредственном контакте с контролируемой средой. При измерении уровня агрессивных сред это вызывает необходимость либо использования специальных материалов для дифманометров, либо применения схем подключения дифманометров, не допускающих попадания активных сред в дифманометр, например включения в импульсные линии разделительных устройств, продувка импульсных линий чистой водой и т. д.

От этого недостатка свободен один из типов гидростатических уровнемеров — барботажный пневмоуровнемер.

### 14.3. Поплавковые и буйковые уровнемеры

*Поплавковым* называется уровнемер, основанный на измерении положения поплавка, частично погружаемого в жидкость, причем степень погружения поплавка (осадка) при неизменной плотности жидкости неизменна. Об уровне судят по положению указателя, соединенного с поплавком гибкой (лента, трос) или жесткой механической связью. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости, и, следовательно, по его положению может быть определено значение уровня. При движении поплавка на него действуют следующие силы: сила тяжести поплавка  $G$ , выталкивающая сила газовой и жидкой фаз, силы сопротивления  $P_c$  в подвижных элементах уровнемера. Поплавковые уровнемеры используются для измерения уровня в резервуарах при невысоком избыточном давлении, поэтому выталкивающей силой газовой фазы на поплавок можно пренебречь. В этом случае силы, действующие на поплавок, связаны соотношением  $G \pm P_c = V_{ж}\rho_{ж}g$ , где  $V_{ж}$  — объем погруженной части поплавка;  $\rho_{ж}$  — плотность жидкости.

Сила сопротивления  $P_c$  направлена против движения поплавка и поэтому изменяет знак при изменении направления движения. Из последнего уравнения можно получить выражение

$$V_{ж} = (G \pm P_c) / \rho_{ж}g. \quad (14.7)$$

Объем  $V_{ж}$  однозначно определяет осадку (глубину погружения), поплавок

ка. При изменении плотности контролируемой жидкости на  $\Delta\rho_{ж}$  изменяется объем погруженной части на  $\Delta V_{ж}$ , что приводит к изменению осадки, т. е. к появлению дополнительной погрешности. Из (14.7) можно получить выражение для  $\Delta V_{ж}$  в виде

$$\Delta V_{ж} = \frac{\partial V_{ж}}{\partial \rho_{ж}} \Delta \rho_{ж} = -V_{ж} \frac{\Delta \rho_{ж}}{\rho_{ж}}$$

Таким образом, объем погруженной части  $V_{ж}$ , а следовательно, осадка поплавка, является параметром, определяющим дополнительную погрешность, вызванную изменением плотности контролируемой жидкости. Для уменьшения этой погрешности целесообразно уменьшение осадки поплавка, что может быть достигнуто либо увеличением площади поперечного сечения поплавка, либо уменьшением сил  $P_c$ , либо облегчением поплавка.

Размеры поплавка ограничиваются размерами уровнемера, масса поплавка не может быть сильно уменьшена из-за необходимости обеспечения требуемого натяжения гибкого элемента и преодоления сил трения. Значение сил сопротивления определяется выбором схемы связи поплавка с измерительной схемой уровнемера.

Наибольшее распространение получили уровнемеры с механической связью поплавка с измерительной схемой, причем эта связь может быть образована как гибкими элементами (тросом, лентой), так и жесткими (рычагом, рейкой). Использование гибких элементов практически исключено в уровнемерах для сосудов под давлением из-за сложности герметизации выводов. Герметизация проще обеспечивается в рычажных уровнемерах, однако их недостатком является небольшой диапазон измерения — до нескольких десятков сантиметров (при гибкой связи диапазон измерения достигает 12 м).

Некоторое распространение имеют уровнемеры с немеханической связью поплавка с измерительной схемой. Например, поплавок может нести ампулу с радиоактивным изотопом, а установленный в верхней части сосуда детектор регистрирует интенсивность излучения, пропорциональную удалению поплавка от детектора. В других конструкциях поплавков может нести переключку, закорачиваю-

щую по мере изменения уровня две параллельные струны из высокоомного материала, расположенные по высоте сосуда. Возможен также индуктивный способ определения положения поплавка.

В таких уровнемерах поплавков несут какой-либо элемент, который может изменить индуктивность длинной катушки, расположенной по оси сосуда. Выходным сигналом является индуктивность катушки, которая определенным образом связана с положением поплавка, т. е. со значением уровня. Диапазон измерения индуктивных поплавковых уровнемеров может быть увеличен использованием дискретных схем. В этом случае используется ряд малых по высоте катушек, расположенных в изолированной от жидкости трубе. Перемещаясь вдоль этой трубы, поплавок будет изменять индуктивность той катушки, рядом с которой он находится, что фиксируется измерительной схемой.

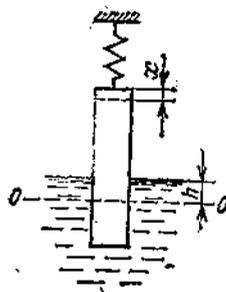


Рис. 14.13. Расчетная схема буйкового уровнемера

Поплавковые уровнемеры обладают определенными достоинствами: простотой устройства, большим диапазоном измерения, достаточно высокой точностью, возможностью измерения уровня агрессивных и вязких сред, широким температурным диапазоном измерения. Недостатки, ограничивающие их применение: наличие поплавка в резервуаре, трудности измерения уровня в резервуарах под давлением.

*Буйковыми* называются уровнемеры, основанные на законе Архимеда: зависимости выталкивающей силы, действующей на боек, от уровня жидкости. Чувствительным элементом таких уровнемеров является массивное тело (например, цилиндр) — боек, подвешенное вертикально внутри сосуда и частично погруженное в контролируемую жидкость (рис. 14.13). Боек закреплен на упругой подвеске с жесткостью  $c$ , действующей на боек с оп-

ределенным усилием (на рис. 14.13 таким элементом является пружина). При увеличении уровня на  $h$  от нулевого положения 00 увеличится выталкивающая сила, что вызовет подъем буйка на  $x$ , причем при подъеме его увеличивается осадка, т. е.  $x < h$ . При этом изменяется усилие, с которым подвеска действует на буюк, причем изменение равно изменению выталкивающей силы, вызванной увеличением осадки буйка на  $(h-x)$ :

$$xc = (h-x)\rho_{ж}gF - (h-x)\rho_{г}gF,$$

где  $c$  — жидкость подвески;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{г}$  — плотность жидкости и газа;  $F$  — площадь поперечного сечения буйка.

Отсюда легко получить выражение для статической характеристики буйкового уровнемера:

$$x = h/(1 + c/(\rho_{ж} - \rho_{г})gFl). \quad (14.8)$$

Таким образом, статическая характеристика буйкового уровнемера линейна, причем чувствительность его может быть увеличена увеличением  $F$  или уменьшением жесткости подвески  $c$ .

Из (14.8) легко установить, что при использовании конкретного уровнемера дополнительные погрешности могут возникнуть за счет изменения величин  $c$ ,  $F$ ,  $\rho_{ж}$ — $\rho_{г}$ . Причиной изменения этих величин является изменение температуры и давления в сосуде, при этом наибольшей является погрешность, вызванная изменением  $\rho_{ж}$ — $\rho_{г}$ .

На рис. 14.14 изображена схема уровнемера с торсионной подвеской и пневматическим выходом.

Буюк 1 подвешен на рычаге 2, закрепленном на призматической подушке 3, которая опирается на ножевую опору 4. К подушке жестко прикреплен конец торсионной трубки 5, второй конец которой посредством фланца 6 жестко и герметично крепится на кронштейне 7, представляющем собой часть корпуса уровнемера. Таким образом, конец 6 трубки неподвижен, другой конец может поворачиваться вместе с подушкой 3. Внутри трубки пропущен жесткий стержень 8, приваренный к подушке 3. На свободном конце стержня находится заслонка 9 пневмопреобразователя. При изменении уровня происходит поворот подушки 3 вместе с закрепленным на ней концом торсионной трубки 5, при этом изменяется усилие, с которым трубка воздействует на буюк. Одновременно с поворотом подушки 3 поворачивается заслонка 9, изменяется зазор между ней и соплом 10, что приводит к изменению давления на входе и выходе пневмоусилителя и изменению показаний измерительного прибора ИП.

Основная погрешность такого уровнемера колеблется в пределах 1—1,5%. Кроме описан-

ной схемы буйкового уровнемера существуют другие разновидности. В частности, выпускаются уровнемеры УБ-Э и УБ-П соответственно с электрическим и пневматическим унифицированными выходными сигналами, основанные на принципе силовой компенсации (преобразователи с силовой компенсацией см. в § 10.5). Эти преобразователи выпускаются классов 1 и 1,5 с диапазонами измерения 0—0,04 и 0—16 м. Существуют буйковые уровнемеры, в которых буюк несет сердечник дифференциально-трансформаторного передающего преобразователя (см. § 10.2). Очевидно, что в таких уровнемерах максимальное перемещение буйка должно

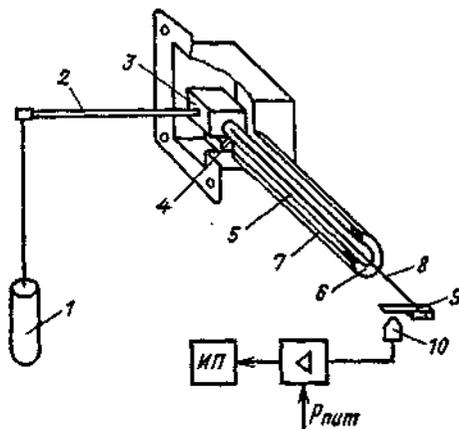


Рис. 14.14. Схема буйкового уровнемера с торсионной подвеской

быть равно номинальному перемещению сердечника. Буйковые уровнемеры могут использоваться как для измерения уровня ожигенных газов с большой плотностью (азота, неона и др.), так и для контроля сред при давлении до 32 МПа и температуре до +400 °С.

#### 14.4. Емкостные уровнемеры

Емкостными называются уровнемеры, основанные на зависимости электрической емкости конденсаторного преобразователя, образованного одним или несколькими стержнями, цилиндрами или пластинами, частично введенными в жидкость, от уровня жидкости.

Конструкция конденсаторных преобразователей различна для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей. Электропроводными считаются жидкости, имеющие удельное сопротивление  $\rho < 10^6$  Ом·м и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{ж} \geq 7$ . Различие преобразователей состоит в том, что один из электродов уровнемеров для электропроводных жидкостей покрыт изоляционным слоем, электроды преобразователей для неэлектропроводных жидкостей не изолированы.

Электроды могут быть в виде плоских пластин, стержней; в качестве электрода может использоваться металлическая стенка сосуда. Часто применяются цилиндрические электроды, обладающие по сравнению с другими формами электродов хорошей технологичностью, лучшей помехоустойчивостью и обеспечивающие большую жесткость конструкции.

На рис. 14.15, а изображен конденсаторный преобразователь для неэлектропроводных жидкостей, состоящий из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, помещенных в резервуар 3, в котором производится измерение уровня.

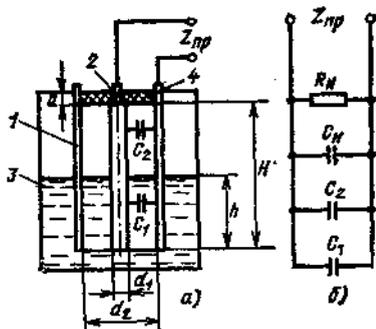


Рис. 14.15. Схема конденсаторного преобразователя уровня для неэлектропроводных жидкостей

Взаимное расположение электродов зафиксировано проходным изолятором 4. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, часть межэлектродного пространства которого высотой  $h$  заполнена контролируемой жидкостью, оставшаяся часть высотой  $H-h$  — ее парами.

В общем виде емкость цилиндрического конденсатора определяется выражением

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon H / \ln(d_2/d_1), \quad (14.9)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство;  $H$  — высота электродов;  $d_1, d_2$  — диаметры соответственно внутреннего и наружного электродов.

На основании (14.9) легко записать выражения для емкости  $C_1$  части преобразователя, находящейся в жидко-

сти, и для емкости  $C_2$  части, находящейся в газовом пространстве:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ж}h}{\ln(d_2/d_1)}; \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r(H-h)}{\ln(d_2/d_1)},$$

где  $\epsilon_{ж}$  и  $\epsilon_r$  — относительные диэлектрические проницаемости жидкости и газа над ней.

Суммарное выходное сопротивление преобразователя  $Z_{пр}$  кроме емкостей  $C_1$  и  $C_2$  определяется также емкостью  $C_n$  проходного изолятора и его активным сопротивлением  $R_n$  (емкость  $C_n$  образуется электродами преобразователя на участке  $a$ ; сопротивление  $R_n$  обусловлено проводимостью материала изолятора на этом участке), а также емкостью и проводимостью соединительного кабеля. Таким образом, электрическая схема преобразователя имеет вид, изображенный на рис. 14.15, б. Суммарная емкость преобразователя

$$C_{пр} = C_1 + C_2 + C_n.$$

Емкость  $C_n$  от значения  $h$  не зависит, кроме того, для газов  $\epsilon_r \approx 1$ , поэтому

$$C_{пр} = C_n + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(d_2/d_1)} H \left[ 1 + (\epsilon_{ж} - 1) \frac{h}{H} \right].$$

Таким образом, при  $\epsilon_{ж} = \text{const}$  емкость  $C_{пр}$  однозначно зависит от измеряемо-

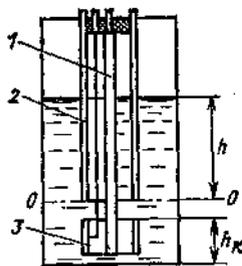


Рис. 14.16. Схема преобразователя с компенсационным конденсатором

го уровня  $h$ . В реальных условиях  $\epsilon_{ж}$  может изменяться (например, при изменении температуры жидкости, ее состава и т. д.).

Для уменьшения влияния изменения  $\epsilon_{ж}$  на показания уровнемера обычно используется компенсационный конденсатор (рис. 14.16). Здесь 1 и 2 — электроды конденсаторного преобразователя, емкость которого зависит от измеряемого уровня  $h$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ж}$ . Нижняя часть электрода 1 и дополнительный электрод 3 образуют компенсационный конденсатор, который постоянно погружен в жидкость, и, следовательно, его

емкость зависит только от  $\epsilon_{ж}$ . Емкость компенсационного конденсатора используется в электронной схеме в качестве корректирующего сигнала.

Недостатком такой схемы введения поправки является увеличение по сравнению со схемой на рис. 14.15 неизмеряемого уровня, обусловленного высотой  $h_{ж}$  электродов компенсационного конденсатора. Следует отметить, что отрицательное влияние на работу емкостных уровнемеров оказывает активное сопротивление преобразователя. Оно складывается из активного сопротивления проходного изолятора ( $R_{п}$  на рис. 14.15, б) и активного сопротивления контролируемой жидкости в межэлектродном пространстве (обычно значение последнего пренебрежимо мало). Для уменьшения влия-

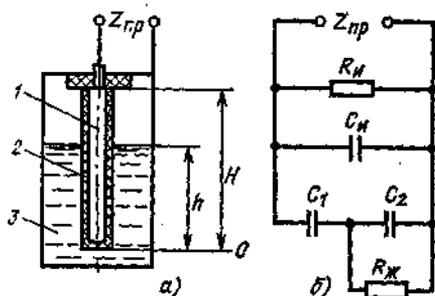


Рис. 14.17. Схема конденсаторного преобразователя уровня для электропроводных жидкостей

ния активного сопротивления преобразователя в схему уровнемера включается фазовый детектор. В конденсаторных преобразователях для электропроводных жидкостей один электрод выполняется изолированным. Если резервуар металлический, то его стенки могут быть использованы в качестве второго электрода.

Если резервуар неметаллический, то в жидкость устанавливается металлический неизолированный стержень, выполняющий роль второго электрода. На рис. 14.17, а изображена схема преобразователя, выполненного в виде стержня 1, покрытого слоем изоляции 2 и погруженного в металлический резервуар 3.

Если пренебречь диэлектрической проницаемостью газов над жидкостью по сравнению с диэлектрической проницаемостью изоляции электрода, то электрическую схему преобразователя можно представить в виде, изображен-

ном на рис. 14.17, б. Зависящую от уровня емкость преобразователя можно представить как емкость двух последовательно соединенных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Параметр  $C_1$  — емкость конденсатора, обкладками которого являются поверхность электрода 1 и поверхность электропроводной жидкости на границе с изолятором 2. Диэлектриком этого конденсатора является материал изолятора. При увеличении  $h$  увеличивается площадь обкладки — поверхность жидкости, что ведет к увеличению  $C_1$ . Параметр  $C_2$  — емкость конденсатора, одной обкладкой которого является поверхность жидкости на границе с изолятором 2 (общая с обкладкой конденсатора  $C_1$ ), второй — поверхность резервуара 3. С увеличением  $h$  емкость  $C_2$  также

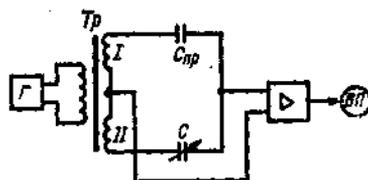


Рис. 14.18. Принципиальная схема электронного индикатора уровня ЭИУ

растет. Параметр  $R_{ж}$  — активное сопротивление жидкости;  $C_{п}$ ,  $R_{п}$  — емкость и активное сопротивление проходного изолятора. Таким образом, полная емкость преобразователя определяется выражением

$$C_{пр} = C_{п} + C_1 C_2 / (C_1 + C_2).$$

Как и в схеме рис. 14.15, наличие активной составляющей в выходном сопротивлении  $Z_{пр}$  преобразователя может привести к появлению погрешности, во избежание чего в схеме устанавливается фазовый детектор.

В емкостных уровнемерах для измерения электрической емкости преобразователя используются резонансные и мостовые схемы.

Наиболее простыми являются мостовые схемы, примером которых может быть схема электронного индикатора уровня ЭИУ (рис. 14.18). Мост состоит из двух вторичных обмоток I и II трансформатора  $Tр$  (питаемого генератором Г), емкости преобразователя  $C_{пр}$  и подстроечного конденсатора С. Мост уравновешен при нулевом уровне жидкости, при этом сигнал на входе и выходе усилителя равен нулю. При

увеличении уровня емкость  $C_{пр}$  растет, разбаланс моста увеличивается и напряжение на входе усилителя возрастает. Усилителем этот сигнал усиливается, преобразуется в унифицированный и измеряется вторичным прибором ВП. Диапазоны измерения уровнемеров ЭИУ определяются типом преобразователя и могут изменяться от 1 до 20 м; предел допускаемой основной погрешности 2,5%.

Емкостные уровнемеры нашли широкое распространение из-за дешевизны, простоты обслуживания, удобства монтажа первичного преобразователя на резервуаре, отсутствия подвижных элементов, возможности использования в достаточно широком интервале температур (от криогенных до  $+200^\circ\text{C}$ ) и давлений (до 6 МПа). К числу недостатков их следует отнести непригодность для измерения уровня вязких (динамическая вязкость более 1 Па·с), пленкообразующих, кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей, а также высокую чувствительность к изменению электрических свойств жидкости и изменению емкости кабеля, соединяющего первичный преобразователь с измерительным прибором.

#### 14.5. Индуктивные уровнемеры

Принцип действия индуктивных уровнемеров основан на зависимости индуктивности одиночной катушки или взаимной индуктивности двух катушек от глубины погружения их в электропроводную жидкость. Такая зависимость обусловлена возникновением в жидкости под действием магнитного поля переменного тока возбуждения вихревых токов, магнитное поле которых оказывает размагничивающее действие на поле тока возбуждения. Действительно, по определению индуктивности  $L$  катушки представляет собой отношение магнитного потока  $\Phi$  к току  $I$  создающему этот поток:  $L = \Phi/I$ . При погружении катушки в жидкость в ней создаются вихревые токи, магнитное поле которых по закону Ленца направлено навстречу основному, т. е. результирующий магнитный поток будет меньше потока «сухой» катушки. Это означает, что индуктивность погруженной катушки меньше индуктивности сухой катушки. Таким образом, если индуктивный преобразо-

ватель представляет собой одиночную длинную катушку, то ее индуктивность и полное сопротивление  $Z = R + j\omega L$  будут зависеть от глубины погружения ( $R$  — активное сопротивление катушки,  $\omega$  — круговая частота тока возбуждения). Существуют индуктивные преобразователи, содержащие две индуктивно связанные катушки, образующие трансформатор (трансформаторные преобразователи).

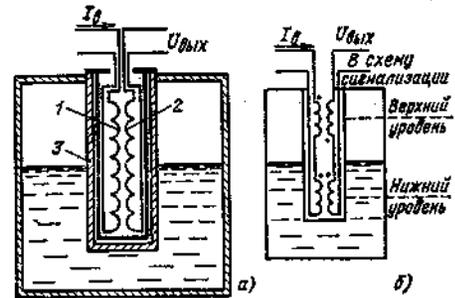


Рис. 14.19. Схема индуктивного трансформаторного преобразователя уровня:

а — аналогового уровнемера; б — сигнализатора предельных значений уровня

При изменении индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  обеих катушек изменяется их взаимная индуктивность  $M$  в соответствии с выражением

$$M = k\sqrt{L_1 L_2},$$

где  $k$  — коэффициент связи, определяемый потоками рассеяния.

В реальных конструкциях таких преобразователей обмотки выполняются катушкой в два провода, при этом  $L_1 = L_2 = L$  и  $k \approx 1$ .

(Из принципа действия индуктивных уровнемеров видно, что они пригодны для измерения уровня только электропроводных сред. Кроме того, поскольку интенсивность вихревых токов зависит от электропроводности среды, изменение ее в процессе измерения вызовет появление дополнительной погрешности.

Наибольшее распространение эти уровнемеры получили для измерения уровня жидкометаллического теплоносителя в ядерных энергетических установках.

Простейшая схема индуктивного трансформаторного преобразователя представлена на рис. 14.19, а. Преобразователь состоит из обмотки возбуждения  $I$ , по которой протекает

переменный ток возбуждения  $I_b$ , и вторичной обмотки 2, с которой снимается выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$ . Преобразователь помещен в металлический защитный чехол 3, который герметично закреплен в крышке резервуара. Это позволяет осуществлять замену уровнемера без нарушения герметичности контура. Как уже указывалось, под действием потока возбуждения в толще контролируемой среды (например, жидкого металла) возникают вихревые токи. Это приводит к зависимости взаимной индуктивности  $M$  между обмотками от уровня металла. Эта зависимость линейна по всей длине обмо-

тением проводимости чехла и контролируемой среды. Кроме того, на результат измерения будут оказывать влияние изменения состава среды, а также изменение со временем свойств материалов чехла. При измерении уровня жидких металлов влияние будет оказывать также наличие на чехле пленки расплава или пленки окислов. Автоматическая компенсация этих погрешностей представляет собой трудную задачу из-за сложности измерения влияющих величин и сложного характера влияния их на погрешность.

Преобразователи трансформаторного типа удобно использовать в качестве сигнализаторов предельных значений уровня. В этом случае преобразователь состоит из двух отдельных коротких трансформаторов, разнесенных на расстояние, равное разности верхнего и нижнего уровней (рис. 14.19, б). Первичные обмотки трансформаторов включены последовательно и питаются от одного источника. Вторичные обмотки включены встречно, и разностный сигнал идет в схему сигнализации.

Срабатывание схемы аварийной сигнализации происходит при нулевом значении выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ , т. е. если ЭДС во вторичных обмотках трансформаторов будут равными. Очевидно, что это будет в том случае, если оба трансформатора окажутся одновременно либо ниже уровня (т. е. когда уровень достигнет верхнего аварийного значения), либо выше уровня (когда уровень достигнет нижнего аварийного значения). При промежуточных значениях уровня  $U_{\text{вых}} \neq 0$  и срабатывания схемы сигнализации не происходит.

Меньшее влияние перечисленные выше факторы оказывают на работу индуктивных уровнемеров дискретного действия. В таких уровнемерах фиксируется достижение определенных значений уровня, т. е. указатель переместится на соседнюю отметку только при изменении уровня на определенное значение — шаг дискретности.

Преобразователь дискретного уровнемера представляет собой ряд коротких катушек индуктивности  $I$  (рис. 14.20, а), помещенных в виде столба внутри металлического чехла 2, отделяющего катушки от среды (рис. 14.20, б). Как уже указывалось, ин-

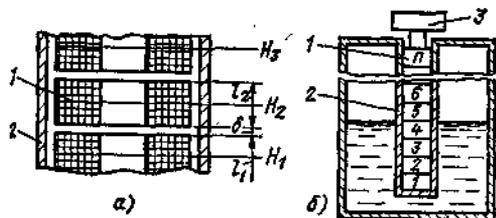


Рис. 14.20. Схема индуктивного преобразователя дискретных уровнемеров

ток, кроме концевых участков, длиной, равной их диаметру, где характеристика искривляется. Таким образом, ЭДС  $E = \omega MI_b$  во вторичной обмотке, а следовательно, и выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  будут линейно зависеть от уровня. Из рис. 14.19, а видно, что взаимодействие поля возбуждения и поля вихревых токов осуществляется через металлический защитный чехол, который ослабляет поля и, следовательно, ухудшает чувствительность преобразователя, причем экранирующее действие чехла увеличивается с ростом частоты  $\omega$  тока возбуждения  $I_b$ . Однако выбирать низкое значение  $\omega$  нецелесообразно, так как при этом уменьшается ЭДС  $E$  во вторичной обмотке, а следовательно, и  $U_{\text{вых}}$  (обычно частота выбирается равной 4—5 кГц).

Основным недостатком трансформаторных преобразователей уровня является влияние изменения температуры контролируемой среды на результат измерения. Это влияние обусловлено изменением активного сопротивления обмоток в зависимости от изменения температуры и изменением их индуктивности в связи с линейным расширением провода, а также изме-

дуктивность катушки зависит от глубины ее погружения в среду, поэтому индуктивность и комплексное сопротивление катушки, расположенной ниже уровня, имеют меньшее значение, чем катушки, расположенной выше уровня. В головке преобразователя  $Z$  располагаются вспомогательные катушки, индуктивность которых от уровня не зависит. Все рабочие катушки  $1, 2, 3, \dots, n$  и вспомогательные катушки включены в следящую логическую схему, которая отыскивает первую сверху катушку, расположенную ниже уровня. Это дает возможность судить о положении уровня, если известны размеры катушек и их положение относительно дна резервуара. Принципиально важным является то обстоятельство, что следящая система не измеряет непосредственно индуктивности рабочих катушек, а отыскивает две соседние катушки с резко различающимися индуктивностями (это имеет место, если одна из них расположена ниже уровня металла, а вторая — выше), причем количественное различие индуктивностей роли не играет. Это означает, что следящая система работает в релейном режиме, обеспечивающем высокую помехозащищенность дискретных индуктивных уровнемеров. Обратимся к рис. 14.20, а. Предположим, что индуктивность катушки изменяется скачком при прохождении уровня через ее середину. Из этого следует, что при изменении уровня в интервале  $H_1 - H_2$  или  $H_2 - H_3$  и т. д. индуктивности катушек не изменяются, т. е. показания приборов также не изменяются. Изменение показаний будет происходить только при достижении уровнем значений  $H_1, H_3$  и т. д. Таким образом, шаг дискретности уровнемера будет равен  $H_2 - H_1, H_3 - H_2$  и т. д. Очевидно, что погрешность  $\Delta$  измерения, вызванная дискретностью, будет определяться длиной  $l$  соседних катушек и расстоянием  $\delta$  между ними [ $\Delta = \delta + (l_1 + l_2)/2$ ]. Это дает возможность обеспечить высокую точность измерения путем уменьшения длины катушек и расстояния между ними на рабочих участках изменения уровня (на остальных участках длина катушек может быть увеличенной).

Изменение свойств контролируемого жидкого металла (в том числе и за счет изменения температуры), а также

налипший на чехол слой металла и его окислов не приведет к нарушению работоспособности прибора. Действительно, перечисленные факторы могут только уменьшить степень изменения индуктивности катушек, погруженных в металл относительно «сухих», что как указывалось выше, не влияет на работу следящей системы. Суммируя сказанное, можно перечислить достоинства дискретных индуктивных уровнемеров: независимость показаний изменения температуры среды и наличия на чехле пленок расплава из окислов (при измерении уровня металла).

В настоящее время выпускают дискретные индуктивные уровнемеры типа «Квант», предназначенные для измерения уровня расплавленных металлов с температурой до  $680^\circ\text{C}$ .

#### 14.6. Радиоволновые уровнемеры

Рассмотренные выше уровнемеры можно считать уровнемерами общепромышленного назначения, так как они могут быть использованы в подавляющем большинстве случаев, требующих измерения уровня в различных отраслях промышленности. Существуют, однако, технологические процессы, требующие измерения уровня, но характеризующиеся тяжелыми условиями работы уровнемеров. К числу таких процессов относятся, например, процессы металлургического производства, в которых требуется измерение уровня жидкого металла. Особые условия работы уровнемеров обусловлены высокой (до  $2000^\circ\text{C}$ ) температурой жидкого металла, агрессивностью жидкого металла и шлака, разнообразием конструкций объектов измерения, требуемой высокой точностью измерения и надежностью работы.

Среди рассматриваемых типов уровнемеров для этой цели возможно применение радиоизотопных уровнемеров, однако их эксплуатация затруднительна из-за необходимости принятия специальных мер биологической защиты и сложности обслуживания.

Перспективным методом измерения уровня жидких металлов является радиоволновой метод. Радиоволновыми называются уровнемеры, основанные на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня жидкости.

К радиоволновым методам относятся радиолокационный, радионтерференционный, эйдовибраторный и резонансный.

Работа радиолокационных уровнемеров основывается на явлении отражения электромагнитных волн от границы раздела сред, различающихся электрическими и магнитными свойствами.

Скорость  $v$  распространения электромагнитной волны в среде определяется значениями ее диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей:

$$v = c / \sqrt{\epsilon \mu},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Схема уровнемера (рис. 14.21) состоит из излучателя 1, приемника 2 электромагнитной энергии и схемы 3 измерения интервала времени. Значение уровня  $h$  определяется посредством измерения временного интервала между моментом послышки сигнала излучателем 1 и приходом отраженного сигнала на приемник 2. Эти величины связаны соотношением

$$\tau = 2(H - h) \sqrt{\epsilon_{\mu}} / c.$$

Обычно локация ведется через газовую среду над жидкостью (в принципе локация может осуществляться и через жидкость, если она неэлектропроводна). Локация через газ предпочтительнее, так как излучатели не подвергаются воздействию жидкости, кроме того, магнитные и диэлектрические проницаемости газов невелики и практически не зависят от изменения параметров и свойств газа. Это делает по-

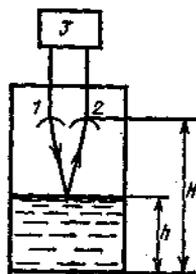


Рис. 14.21. Схема радиолокационного уровнемера

казания уровнемера практически не зависящими от свойств жидкости. Недостатком таких уровнемеров является трудность точного измерения малых интервалов времени. Кроме того, они очень чувствительны к нахождению в зоне излучения посторонних предметов, например металлических стенок емкостей. Для устранения этого недостатка необходимо применять узконаправленное излучение с помощью рупорных антенн.

Существуют схемы радиолокационных уровнемеров, в которых локация осуществляется через стенку рабочей емкости. Применительно к металлургическому производству таким образом можно контролировать границу раздела шлак — металл либо осуществлять непрерывное измерение уровня (существующие приборы имеют диапазон измерения до 200 мм).

Схема такого прибора представлена на рис. 14.22. В качестве излучателя радиоволн, генерируемых генератором 1, используется рупор 2, высота раскрытия которого равна диапазону измерения. Изменение уровня среды по высоте рупора приводит к изменению прошедшей и отраженной высокочастотной энергии, вследствие чего изменяется сигнал на детекторе 3 и вторичном преобразователе 4. Для использования этого метода измерения в стенках емкости должны быть радиопрозрачные окна, в которые вставляются рупорные излучатели. При измерении уровня жидких металлов в объектах металлургии такие окна достаточно делать лишь в металлических стенках 5, так как используемые в настоящее время футеровочные материалы 6 радиопрозрачны.

В резонансных уровнемерах резонансные колебания возбуждаются в отрезках длинной электрической линии. Этот отрезок длинной линии — первичный преобразователь — либо выполняется в виде отдельного конструктивного элемента, помещенного в резервуар, либо его роль могут выполнять конструктивные элементы технологической установки (например, при измерении уровня жидких металлов в металлургии).

Обычно первичный преобразователь представляет собой тонкостенную металлическую трубу с боковыми отверстиями и соосно расположенным в ней металлическим стержнем (рис. 14.23). Применение резонансных уровне-

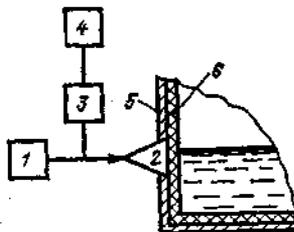
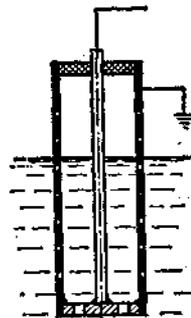


Рис. 14.22. Схема радиолокационного уровнемера для контроля уровня жидких металлов

Рис. 14.23. Схема преобразователя резонансного уровнемера



меров при измерении уровня проводящих жидкостей основывается на шунтировании элементов преобразователя, т. е. уровень эквивалентен подвижной перемычке между трубой и стержнем преобразователя. При изменении уровня изменяется длина линии, что ведет к изменению резонансной частоты преобразователя. Например, при заполнении преобразователя (рис. 14.23) уменьшается его длина и увеличивается резонансная частота. Эта зависимость является нелинейной.

Применительно к конкретным условиям работы могут использоваться преобразователи других конструкций. Например, для кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок большого сечения (не менее 250×550 мм) преобразователь подобен изображенному на рис. 14.23, но на конце его вместо металлического доньшка закреплен виток проволоочного проводника. Преобразователь закрепляется таким образом, чтобы виток находился над уровнем металла, при этом его индуктивность будет зависеть от уровня металла. Резонансная частота такой электрической линии с индуктивностью на конце зависит от этой индуктивности, т. е. от уровня металла. Такие уровнемеры жидких металлов имеют диапазон измерения до 200 мм, основная погрешность измерения ±2 %.

Для кристаллизаторов малого сечения (с максимальным поперечным размером сечения 150 мм) применение преобразователя с индуктивной нагрузкой неэффективно, так как при уменьшении размеров витка уменьшается диапазон измерения. Для таких кристаллизаторов разработан уровнемер (рис. 14.24), в котором система «металл промежуточного ковша 1 — струя металла 2 — металл кристаллизатора 3» рассматривается как измерительный отрезок длиной электрической линии, длина которого, а следовательно, и резонансная частота определяются уровнем металла в кристаллизаторе.

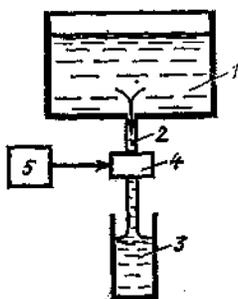


Рис. 14.24. Схема резонансного уровнемера для машин непрерывного литья

Подвод энергии к колебательной системе может быть осуществлен, например, посредством металлического кольца 4, установленного между ковшом и кристаллизатором на одной оси со струей металла и подключенного к высокочастотному генератору 5.

Диапазон измерения такого уровнемера составляет 300 мм.

#### 14.7. Акустические уровнемеры

По принципу действия акустические уровнемеры можно подразделить на локационные, поглощения и резонансные.

В локационных уровнемерах используется эффект отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела жидкость — газ. Положение уровня определяется по времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от поверхности раздела. В уровнемерах поглощения положение уровня определяется по ослаблению интенсивности ультразвука при прохождении через слой жидкости и газа. В резонансных уровнемерах измерение уровня производится посредством измерения частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от уровня жидкости.

Наибольшее распространение получили локационные уровнемеры. Лока-

ция уровня может производиться либо через газовую среду над жидкостью (такие уровнемеры иногда называют акустическими), либо снизу через слой жидкости (такие уровнемеры иногда называют ультразвуковыми). Недостатком первого типа уровнемеров являются погрешность от зависимости скорости ультразвука от давления и температуры газа и сильное поглощение ультразвука газом, что требует

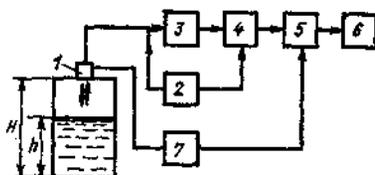


Рис. 14.25. Схема акустического уровнемера ЭХО-1

большой мощности источника, чем при локации через жидкость. Однако на показаниях таких уровнемеров не сказывается изменение характеристик жидкости, поэтому такие уровнемеры могут быть использованы для измерения уровня жидкостей неоднородных, содержащих пузырьки газа или кристаллизующихся. Такие уровнемеры используются для жидкостей, имеющих температуру не более 80 °С и давление не более 4 МПа.

Уровеньмеры с локацией через жидкость могут быть использованы для сред под высоким давлением, для них требуется небольшая мощность источника, однако они чувствительны к включениям в жидкость, например к пузырькам газа при вскипании. Поэтому эти уровнемеры применимы только для однородных жидкостей. Кроме того, они также чувствительны к изменению температуры и давления среды из-за зависимости от них скорости распространения ультразвука в жидкости. На рис. 14.25 представлена упрощенная схема акустического уровнемера с локацией уровня со стороны газа типа ЭХО-1. Источником и одновременно приемником отраженных ультразвуковых колебаний является пьезоэлемент, заключенный в акустический преобразователь 1. Локация осуществляется ультразвуковыми импульсами, которые возбуждаются пьезоэлементом путем подачи на него электрических импульсов от генерато-

ра 2. Одновременно генератор включает схему измерения времени 4. Отраженный ультразвуковой импульс возвращается на пьезоэлемент через время  $t$ , соответствующее контролируемому уровню в соответствии с выражением

$$t = 2(H - h)/c,$$

где  $c$  — скорость ультразвука в газе.

Пьезоэлемент преобразует отраженный ультразвуковой импульс в электрический сигнал, который усиливается усилителем 3 и подается на схему измерения времени 4. Преобразователь 5 преобразует значение времени в унифицированный выходной сигнал 0—5 мА, измеряемый вторичным прибором 6!

Для уменьшения влияния изменения температуры газа имеется блок температурной компенсации 7, включающий в себя термометр сопротивления, расположенный внутри акустического преобразователя. Уровнемер ЭХО-1 может иметь диапазоны измерения 0—1, 0—2, 0—3 м; класс точности уровнемера 2,5.

Принципиальная схема уровнемера с локацией через жидкость аналогична представленной на рис. 14.25. Разница может заключаться в ином способе температурной компенсации. Основная погрешность уровнемеров с локацией через жидкость не превышает 2,5 % диапазона измерения уровня.

#### 14.8. Термокондуктометрические уровнемеры

Термокондуктометрическими называются уровнемеры, элементом электрической цепи которых является нагреваемый током резистор с большим температурным коэффициентом электросопротивления, электрическое сопротивление которого зависит от уровня жидкости. Принцип действия таких уровнемеров основан на различии условий теплообмена в жидкостях и газах.

Чувствительный элемент таких уровнемеров представляет собой протяженный терморезистор, электрическое сопротивление которого определяется его температурой. Обычно они изготавливаются из платины или вольфрама, причем чувствительность преобразователя увеличивается с ростом температурного коэффициента электросо-

противления материала. Термокондуктометрический преобразователь помещается в резервуар таким образом, что часть его находится в жидкости, остальная часть — в газовом пространстве (рис. 14.26). При изменении уровня изменяется длина этих участков.

Так как в общем случае температура жидкости и ее паров может быть одинаковой, то осуществляется подогрев преобразователя. При прямом подогреве подогрев преобразователя осуществляется проходящим через него

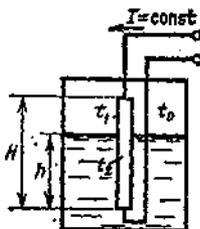


Рис. 14.26. Схема термокондуктометрического преобразователя уровня

током постоянной силы. При косвенном подогреве преобразователь должен иметь дополнительный подогреватель.

Принцип действия термокондуктометрического преобразователя заключается в использовании различия теплоотдачи от нагретого терморезистора к жидкости и газу, вследствие чего участки его, находящиеся в жидкости и газе, имеют различную температуру и, следовательно, различное сопротивление. Таким образом, суммарное их сопротивление будет определяться уровнем. Если предположить, что преобразователь имеет линейную зависимость сопротивления от температуры, то можно легко получить выражение статической характеристики такого преобразователя.

Предположим, что при отсутствии жидкости («сухой» преобразователь) преобразователь имеет температуру  $t_1$ , при этом его погонное (на единицу длины) сопротивление равно  $r_0$  и температурный коэффициент сопротивления равен  $\alpha$ . При длине преобразователя  $H$  его полное сопротивление  $R_0 = r_0 H$ .

При уровне жидкости  $h$  погруженная часть стала иметь температуру  $t_2$ , при этом полное сопротивление преобразователя определяется выражением  $R_h = r_0 h [1 + \alpha(t_2 - t_1)] + r_0(H - h)$ . Таким образом, зависимость между приращением сопротивления  $\Delta R$  и уровнем

$h$  (статическая характеристика) будет иметь вид

$$\Delta R = R_h - R_0 = r_0 \alpha (t_2 - t_1) h. \quad (14.10)$$

Из (14.10) следует, что статическая характеристика преобразователя линейна (при линейной характеристике терморезистора). Коэффициент преобразования  $\Delta R/h$  растет с увеличением погонного сопротивления терморезистора и его температурного коэффициента сопротивления. Коэффициент преобразования увеличивается также с ростом температуры  $t_1$  «сухого» преобразователя (так как при этом увеличивается разность  $t_2 - t_1$ ), однако чрезмерное повышение температуры «сухого» преобразователя недопустимо из-за опасности нарушения режима теплоотдачи, повреждения терморезистора и подогрева контролируемой жидкости. Основной областью применения термокондуктометрических уровнемеров является криогенная техника, где они используются для измерения уровня сжиженных газов.

Для измерения уровня жидкого гелия широко используются уровнемеры, использующие явление сверхпроводимости. Эффект сверхпроводимости состоит в том, что при температуре металла ниже критической  $T_k$  его сопротивление становится нулевым. Таким образом, если температура погруженной части преобразователя будет ниже критической, то сопротивление этой части будет нулевым и общее сопротивление преобразователя будет определяться только сопротивлением его сухой части. Чувствительные элементы таких преобразователей изготавливают из тантала ( $T_k = 4,3$  К), сплава 65-БТ ( $T_k \approx 10$  К), сплавов ниобия с титаном ( $T_k = 9,7$  К) и ниобия с цирконием ( $T_k = 10,8$  К). Тантал может быть использован для измерения уровня гелия, находящегося при атмосферном или слегка пониженном давлении. При значительном понижении давления над жидким гелием работа уровнемера ухудшается, а при давлениях, даже немного превышающих атмосферное, чувствительный элемент из тантала вообще не переходит в сверхпроводящее состояние. В этих случаях нужно применять сплав 65-БТ или сплавы ниобия с титаном или цирконием. При использовании сплава 65-БТ нет необходимости в дополнительном подогревателе; кроме того, изменение темпе-

ратуры газовой фазы мало сказывается на показаниях. Из-за высокой критической температуры при измерении уровня жидкого гелия граница между сверхпроводящей и нормально частями терморезистора практически не изменяется при понижении температуры ванны (при понижении температуры она смещается вверх относительно контролируемого уровня). Следует отметить, что на результате измерения сказывается изменение интенсивности испарения жидкого газа из-за изменения режима охлаждения сухой части терморезистора.

Термокондуктометрические преобразователи обычно изготавливаются в виде тонкой проволоки со специальным защитным покрытием, закрепленной на каркасе. При использовании преобразователей в криогенной технике при измерении уровня сжиженных газов для уменьшения влияния градиента температуры в криостате и интенсивности испарения терморезистор рекомендуется помещать внутри теплоизолирующей вакуумной рубашки дьюаровского типа.

В качестве вторичных приборов могут быть использованы либо приборы, измеряющие падение напряжения на терморезисторе (которое пропорционально уровню при постоянном токе питания), либо мосты.

Погрешности терморезисторных уровнемеров определяются отклонением от расчетных значений величин, определяющих его статическую характеристику (14.10). Стабильность  $r_0$  и  $\alpha$  обеспечивается обработкой материала и защитным покрытием проволоки во избежание коррозии поверхности и уменьшения сечения. Изменение температур  $t_1$  и  $t_2$  может произойти из-за изменения температур газовой и жидкой фаз, изменения коэффициентов теплоотдачи на сухом и погруженном участках преобразователя. Влияние изменения температуры газовой фазы может быть уменьшено повышением температуры  $t_1$  сухого участка преобразователя (однако, как уже указывалось, следует иметь в виду опасность чрезмерного увеличения температуры резистора из-за возможного нарушения режима теплоотдачи и разрушения резистора). Распространенным способом уменьшения температурной погрешности является использование компенсационных терморезисторов, один

из которых постоянно находится в жидкости, второй — в газе. Все три резистора включаются в схему логометра, являющегося вторичным прибором.

#### 14.9. Измерение уровня сыпучих материалов

Имеется ряд обстоятельств, усложняющих задачу измерения уровня сыпучих материалов по сравнению с измерением уровня жидкостей. Прежде всего это неоднородность вещества в объеме, связанная с наличием пространства между твердыми частицами, заполненного газом. Степень неоднородности зависит от размеров частиц и непосредственно влияет на физические свойства материала, что усложняет применение методов измерения уровня, использующих определенные физические свойства. Следующая трудность измерения уровня обусловлена ограниченной подвижностью частиц из-за действия сил трения и сцепления между частицами, результатом чего является отсутствие горизонтальной плоскости раздела газ-материал. Поверхность сыпучего материала расположена к горизонтальной под углом естественного откоса, причем этот угол при заполнении или опорожнении емкости может быть различным. Ограниченная подвижность частиц приводит также к сводообразованию, нарушающему нормальную работу измерительных устройств.

Следствием ограниченной подвижности является зависимость давления внутри сыпучей массы от ориентации единичной площадки, формы бункера, коэффициента трения материала о стенку, что ограничивает применение методов измерения уровня, основанных на зависимости давления от уровня (по типу гидростатических).

Отрицательными качествами сыпучих материалов является также способность к налипанию и абразивное воздействие. Усложнить работу уровнемеров может также запыленность газового пространства, что влияет на электрические свойства среды, а также предъявляет повышенные требования к обеспечению взрывобезопасности.

Простейшими по принципу действия уровнемерами для сыпучих тел являются массовые, основанные на взвешивании бункера вместе с заполняющим его материалом. В качестве преобразователя в этих уровнемерах может быть использована гидравлическая мессдоза, которая является опорой одной из лап бункера. Мессдоза представляет собой стальной корпус, герметично закрытый мембраной с закрепленным на ней поршнем, на который опирается лапа бункера. Внутренняя полость корпуса (под мембраной) заполнена жидкостью и соединительной линией соединяется с манометром. Давление жидкости в системе мессдозы — манометр равно силе тяжести бункера с материалом, деленной на площадь поршня. Манометр градуируется в единицах массы или уровня. Погрешность таких уровнемеров достигает  $\pm 10\%$ .

В массовых уровнемерах вместо мессдозы могут применяться и более совершенные магнитоупругие преобразователи, обеспечивающие более высокую точность измерения (их погреш-

ность не более  $\pm 5\%$ ). Основным элементом таких преобразователей является металлический чувствительный элемент, магнитная проницаемость которого изменяется при упругой механической деформации. Магнитоупругие преобразователи устанавливаются под опоры бункера и включаются в схему неуравновешенного моста, выходной сигнал которого будет зависеть от степени деформации преобразователя, т. е. от количества материала в бункере.

Из всех электрических методов измерения уровня наиболее применимым является емко-

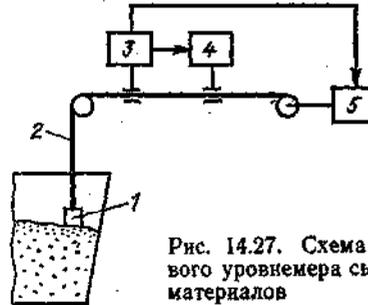


Рис. 14.27. Схема лотового уровнемера сыпучих материалов

стный метод. Это объясняется как простотой конструкции емкостного преобразователя, так и малой чувствительностью их к неоднородностям. Как правило, преобразователи применяются одноэлектродными в виде зондов или изолированных тросов, вторым электродом является стенка бункера или вспомогательный электрод (см. § 14.4). Основными эксплуатационными трудностями применения таких уровнемеров является разрушение изоляционного покрытия преобразователя, налипание материала, зависимость показаний от изменения электрических свойств материала, вызванной, например, изменением его состава или влажности.

Специфическим уровнемером для сыпучих материалов является лотовый (рис. 14.27). Чувствительным элементом таких уровнемеров является массивное тело (лот) 1, подвешенное на гибком тросе 2. В начале цикла измерений лот зафиксирован в предельном верхнем положении. Цикл измерения уровня начинается с момента растормаживания лота, при этом под действием собственного веса лот начинает опускаться. В этот же момент сигнальным устройством 3, реагирующим на натяжение троса, включается отсчетное устройство 4, регистрирующее смещение лота относительно первоначального предельного положения. В момент касания лотом поверхности натяжение троса уменьшается и сигнальное устройство 3 отключает отсчетное устройство, одновременно включая механизм подъема 5 лота, который поднимает лот в исходное положение, после чего цикл измерения повторяется. Показания отсчетного устройства позволяют определить текущее значение уровня. Перед началом следующего цикла измерения показания отсчетного устройства должны быть сброшены.

Для сигнализации загрузки или опорожнения бункеров применяются сигнализаторы уровня. Для электропроводных материалов наиболее простыми являются кондуктометрические сигнализаторы уровня (например, типа ИКС). Сигнализатор может контролировать либо только верхний уровень сыпучего мате-

риала в бункере (в этом случае применяется только один электрод), либо верхний и нижний уровни (применяются два электрода). Принцип действия таких сигнализаторов (рис. 14.28) заключается в замыкании электрической цепи стенка бункера — материал — электрод при касании поверхностью материала электрода. Основные недостатки при эксплуатации: механическое разрушение электродов под дей-

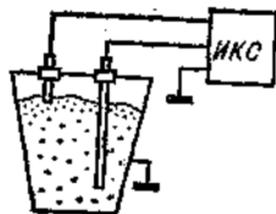


Рис. 14.28. Схема кондуктометрического сигнализатора уровня

ствием материала, возможность ложных срабатываний из-за утечек через запыленную среду (обычно во избежание этого на электроды устанавливают охранные кольца). Для надежной работы сигнализаторы должны быть установлены в местах, где исключена возможность образования пустот.

В качестве сигнализаторов уровня могут использоваться емкостные сигнализаторы с

резонансной схемой измерения (а не мостовой, описанной в § 14.4), например типа ЭСУ-ЭСУ-2 и др.

В таких устройствах емкостный преобразователь, образованный электродом 1 и стенкой бункера 2 (рис. 14.29), совместно с катушкой индуктивности  $L$  образуют колебательный контур, резонансная частота которого определяется емкостью преобразователя, т. е. текущи-

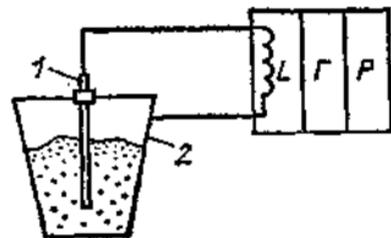


Рис. 14.29. Схема емкостного сигнализатора уровня

значением уровня. При совпадении резонансной частоты контура с частотой напряжения генератора  $\Gamma$  (соответствующей предельному значению уровня) реле  $P$  включает схему сигнализации.

## Глава пятнадцатая

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

## 15.1. Общие сведения о влажности газов, твердых тел и жидких сред

Влажность газов, твердых тел и жидких сред является одним из важных показателей целого ряда технологических процессов в металлургической, химической, пищевой, текстильной, строительной и других отраслях промышленности. Влажность воздуха и газов при технических измерениях может быть охарактеризована следующими параметрами: 1) *абсолютной влажностью*, определяемой количеством водяного пара, содержащегося в единице объема газа,  $г/м^3$ ; 2) *влажностным содержанием* — массой водяного пара, отнесенной к массе сухого газа,  $г/кг$ ; 3) *температурой точки росы* — температурой, при которой газ становится насыщенным содержащимся в нем водяным паром,  $^{\circ}C$ ; 4) *относительной влажностью*, определяемой отношением абсолютной влажности к максимально возможной влажности этого газа при данной температуре, %.

Влажность твердых и сыпучих тел может быть охарактеризована следующими параметрами: 1) *влажностным содержанием* — отношением массы влаги к массе абсолютно сухого тела; 2) *влажностью* — отношением массы влаги к массе влажного тела. Часто эти величины выражаются в процентах.

В зависимости от целей и задач конкретного технологического процесса применяют те или иные параметры, характеризующие влажность. Например, при измерении малых содержаний влаги в чистых газах целесообразнее пользоваться влажностным содержанием; при транспортировке газов по трубопроводам необходимо знать температуру точки росы; а дутье в металлургическом производстве лучше характеризовать относительной влажностью.

Влажностное содержание, температура точки росы и относительная влажность для воздуха и газов могут быть определены по  $I, d$ -,  $S, d$ - или  $I, S$ -диа-

граммам. Первая построена для влажного воздуха при постоянном давлении, равном атмосферному, и для небольших концентраций пара. В некоторых разновидностях  $I, d$ -диаграмм нанесены линии температур мокрого термометра.

В дополнение к  $I, d$ -диаграмме была предложена  $S, d$ -диаграмма для расчета процессов при переменных давлениях. Для расчетов в широкой области влажностных содержаний, температур и давлений применяется  $I, S$ -диаграмма влажного воздуха или  $I, S$ -диаграмма парогазовых смесей.

При измерении влажности материалов необходимо учитывать формы связи влаги с материалом и гигрометрическую взаимосвязь материала и окружающего воздуха. Влагосодержащие материалы могут быть коллоидными, капиллярно-пористыми и коллоидными капиллярно-пористыми телами. К коллоидным относятся тела типа желе, теста, повидла и т.п., к капиллярно-пористым — керамические материалы, песок и т.п. Большинство промышленных материалов являются коллоидными капиллярно-пористыми телами. Количество влаги, которое может быть поглощено материалом, зависит от формы, размеров и расположения капилляров, а также от формы связи воды с материалом. При ионной и молекулярных формах связи воды с материалом (гидратная вода) ее нельзя удалить из материала сушкой или отжатием. При абсорбционной, осмотической или физико-механической формах связи влага может быть удалена из материала в процессе сушки. Различные формы связи влаги с материалом влияют на его физические характеристики различно, и установление зависимости физических свойств материала от содержания влаги связано с определенными трудностями. Поэтому и измерение влажности твердых и сыпучих материалов часто вызывает затруднения и приводит

к неоднозначности градуировочных характеристик.

## 15.2. Методы измерения влажности воздуха и газа

В настоящее время наибольшее распространение в технологических процессах получили следующие методы измерения влажности газов и воздуха: психрометрический, точки росы и гигрометрические.

**Психрометрический метод** измерения влажности основан на измерении психрометрической разности температур между «сухим» и «мокрым» термометрами. Мокрый термометр смачивается через специальный фитиль водой. Испарение, а соответственно и охлаждение с поверхности резервуара мокрого термометра тем больше, чем ниже влажность газа. Поэтому разность температур сухого и мокрого термометров зависит от влажности газа.

**Метод точки росы** основан на определении температуры, при которой газ становится насыщенным находящейся в нем влагой. Эта температура определяется по началу конденсации водяного пара на зеркальной поверхности, температура которой должна устанавливаться любой в интервале температур работы влагомера.

**Гигрометрические методы** основаны на зависимости физических свойств гигроскопических материалов от влажности окружающей среды. К ним относится один из первых гигрометров, использующих удлинение обезжиренных человеческих волос от влажности воздуха. Электрические гигрометры используют зависимость сопротивления или диэлектрической проницаемости гигроскопического материала от влажности окружающего воздуха.

Другие методы измерения влажности газов (полного поглощения, диффузионный, инфракрасного поглощения, теплопроводности и др.) не нашли широкого применения для технологических процессов.

Рассмотрим характерные особенности отдельных методов. Психрометрический метод основан на зависимости между парциальным давлением пара в парогазовой смеси и показаниями сухого и мокрого термометров:

$$p_{н.м} - p = AB(t_c - t_m), \quad (15.1)$$

где  $p$  — парциальное давление пара в парогазовой смеси;  $p_{н.м}$  — парциальное давление насыщенного пара при температуре смеси  $t_m$ ;  $B$  — барометрическое давление;  $A$  — психрометрическая постоянная;  $t_c$  и  $t_m$  — температуры сухого и мокрого термометров.

Относительная влажность может быть определена из (15.1) следующим образом:

$$\varphi = \frac{p}{p_{н.с}} 100 = \frac{100}{p_{н.с}} [p_{н.м} - AB(t_c - t_m)], \quad (15.2)$$

где  $p_{н.с}$  — парциальное давление насыщенного пара при температуре  $t_c$ .

В связи с тем что  $p_{н.м}$  и  $p_{н.с}$  однозначно определяются по  $t_m$  и  $t_c$ , если  $A = \text{const}$ , можно получить зависимость

$$\varphi = f(t_c - t_m, t_c). \quad (15.3)$$

По этой зависимости можно составить психрометрические таблицы. Эти таблицы могут быть различными для разных конструкций мокрого термометра. Психрометрическая постоянная  $A$  определяется условиями теплоотвода от термометра через фитиль в окружающую среду (размерами и формой резервуара или гильзы термометра, теплопроводностью гильзы и ткани фитиля, смоченностью ткани и другими факторами), поэтому практически для каждой новой конструкции  $A$  будет отличным от других. Для обеспечения постоянства  $A$  для каждой конструкции обеспечивают такой режим обдува мокрого термометра (как правило,  $v \geq 3$  м/с), при котором  $A = \text{const}$ . Зависимость (15.3) может быть аппроксимирована семейством прямых  $\varphi = \text{const}$  в координатах  $t_c, t_m$ . Полагая, что прямые  $\varphi = \text{const}$  пересекаются в одной точке с координатами  $t_a, t_b$  (рис. 15.1), можно считать

$$\varphi = f\left(\frac{t_m - t_a}{t_c - t_b}\right). \quad (15.4)$$

Принципиальная измерительная схема психрометра с термометрами сопротивления представлена на рис. 15.2. Аналогичная схема была рассмотрена выше (§ 6.4). При соответствующем подборе плеч мостов можно считать, что  $U_{ab} = k_1(t_m - t_a)$  и  $U_{cd} = k_2(t_c - t_b)$ . В момент компенсации  $U_{ab} = U_{cd} = mU_{cd}$ , где  $m$  — относительное положение движка реохорда. Тогда

$$m = \frac{k_1(t_m - t_a)}{k_2(t_c - t_b)}. \quad (15.5)$$

Шкала психрометра градуируется в процентах относительной влажности. Возможны различные модификации этой схемы, но, как правило, принцип действия ее остается неизменным.

К преимуществам психрометрического метода следует отнести достаточно высокую точность и чувствительность при температурах выше  $0^{\circ}\text{C}$ . К недостаткам метода относится уменьшение чувствительности и точности при низких температурах, а также погрешность, связанная с непостоянством психрометрической постоянной  $A$ .

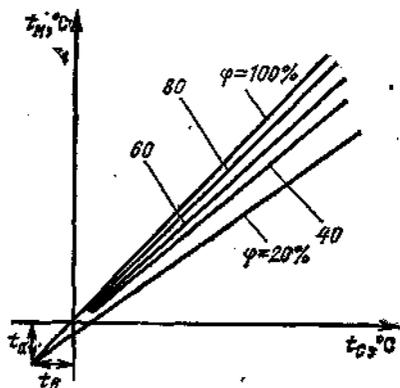


Рис. 15.1. Зависимость относительной влажности от температур мокрого и сухого термометров

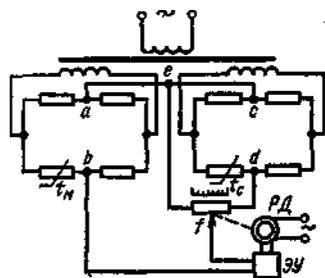


Рис. 15.2. Принципиальная измерительная схема психрометра с термометрами сопротивления

**Метод точки росы.** По температуре точки росы можно определить абсолютную влажность или влагосодержание, а если дополнительно измерить температуру газа, то можно определить и относительную влажность. Этот метод является одним из наиболее точных и позволяет производить измерение влажности при любых давлениях газа как при положительных, так и при отрицательных температурах. Основным чувствительным элементом влагомеров, основанных на измерении температуры точки росы, является

зеркало, которое обдувается анализируемым газом. Это зеркало должно охлаждаться таким образом, чтобы на нем происходила конденсация влаги, находящейся в анализируемом газе. При этом должна фиксироваться температура, при которой начинается выпадение влаги (росы).

Для технических измерений разработаны автоматические влагомеры точки росы. Одна из схем такого влагомера представлена на рис. 15.3. В камеру 1 через патрубок 2 поступает очищенный от примесей и пыли анализи-

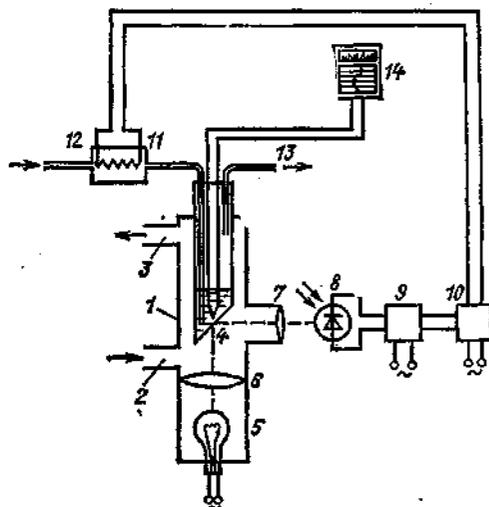


Рис. 15.3. Схема автоматического влагомера точки росы

руемый газ постоянного давления, который затем удаляется по патрубку 3. Проходя через камеру 1, газ омывает зеркало 4. На зеркало 4 от лампы 5 через линзу 6 направляется луч света, который, отразившись от зеркала 4, попадает через линзу 7 на фотоэлемент 8. Возникающий в фотоэлементе ток через усилитель 9 поступает на регулятор 10, который изменяет питание нагревателя 11. Зеркало 4 охлаждается жидкостью, поступающей через патрубок 12 и уходящей через патрубок 13. Температура жидкости может изменяться нагревателем 11. Температура зеркала измеряется термоэлектрическим термометром, подключенным к измерительному прибору 14. Если на зеркале нет влаги, то луч света от него практически без потерь поступает на фотоэлемент. В этом случае регулятор уменьшает нагрев охлаждающей жидкости, температура

которой уменьшается до тех пор, пока на зеркале не выпадает роса. В этом случае на фотоэлемент будет поступать ослабленный световой поток (падая на зеркало, покрытое пленкой росы, свет будет рассеиваться) и регулятор будет увеличивать нагрев охлаждающей жидкости. Таким образом, температура зеркала будет поддерживаться близкой к температуре точки росы. Численное значение этой температуры фиксируется прибором 14. Кроме рассмотренной выше возможны варианты схемы, использующей другие устройства. Но принцип работы влагомера, измеряющего влажность по температуре точки росы, один — создаются условия для выпадения росы (начала конденсации) и определяется температура, при которой это происходит. При практической реализации метода точки росы существуют определенные трудности. Во-первых, фиксация момента начала конденсации («выпадения росы») зависит от метода фиксации (оптический, кондуктометрический и т. д.). Во-вторых, температура точки росы может зависеть от состояния поверхности, на которой происходит конденсация. Например, наличие жира или нефтепродуктов на поверхности конденсации существенно занижает температуру точки росы. В-третьих, при измерении влажности агрессивных газов температуры точки росы могут существенно отличаться от расчетных. Кроме того, агрессивные газы могут вызывать коррозию поверхности, на которой происходит конденсация.

В *гигрометрических влагомерах* чувствительный элемент должен находиться в гигрометрическом равновесии с измеряемым газом. В практике технических измерений получили распространение следующие разновидности гигрометрических преобразователей: электролитические, электролитические с подогревом и сорбционные. В электролитических гигрометрах измерительный преобразователь содержит влапочувствительный элемент, содержащий электролит. Изменение влажности газа вызывает изменение количества влаги, содержащейся во влапочувствительном элементе, что приводит к изменению концентрации электролита во влапочувствительном элементе и соответствующему изменению его сопротивления или электропроводности. В качестве электролита чаще

всего применяют хлористый литий. Измерительные схемы электролитических гигрометров представляют собой различные варианты мостовых измерительных схем. К недостаткам электролитических гигрометров следует отнести нестабильность их градуировочных характеристик, а также влияние температуры и концентрации растворенного вещества на их показания.

Электролитические преобразователи с подогревом по своему устройству близки к электролитическим преобразователям. Однако принцип действия их отличается от электролитических. Изменение электропроводности преобразователя вследствие изменения влажности газа вызывает изменение температуры преобразователя. Если влажность газа увеличивается, то электропроводность преобразователя увеличивается, что приводит к возрастанию тока, увеличению температуры преобразователя и испарению влаги из преобразователя. Это в свою очередь приводит к уменьшению электропроводности, тока и температуры преобразователя. Таким образом, автоматически поддерживается режим, соответствующий равновесному состоянию между парциальным давлением паров воды в анализируемом газе и парциальным давлением пара над насыщенным раствором электролита. Температура, соответствующая этому равновесию, измеряется каким-либо термометром. Электролитические гигрометры с подогревом относительно просты и надежны. Их характеристики практически не зависят от запыления или загрязнения, скорости измеряемого газа, его давления и напряжения питания.

В сорбционных гигрометрах используется изменение физических свойств сорбционных материалов (керамика, микропористых материалов, окисл алюминия и др.) от содержания в них влаги, которое определяется влажностью газа. Как правило, с изменением влагосодержания изменяется либо электрическое сопротивление, либо емкость, либо тангенс диэлектрического потерь, либо какой-нибудь другой параметр измерительного преобразователя. Измерительная схема прибора определяется выходным сигналом измерительного преобразователя. Приборы этого типа отличаются индивидуальными градуировочными характеристиками, поэтому широкое их применение в

промышленных условиях затруднительно.

### 15.3. Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел

Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел условно можно разделить на две группы: 1) прямые методы, позволяющие определять массу влаги или сухого вещества в пробе; 2) косвенные методы, определяющие влажность по параметру, функционально связанному с влажностью.

Прямые методы отличаются высокой точностью измерения и большой длительностью (до 10—15 ч).

Косвенные методы характеризуются высоким быстродействием и значительно меньшей точностью измерения.

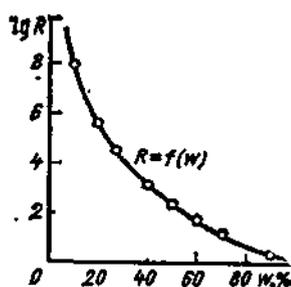


Рис. 15.4. Зависимость электрического сопротивления капиллярно-пористых тел от влажности

В технических измерениях применяются почти исключительно косвенные методы. Из косвенных методов наибольшее распространение получили электрические методы измерения влажности, такие как кондуктометрический, емкостный и некоторые другие. Как отмечалось выше, большинство промышленных материалов являются капиллярно-пористыми телами. В сухом виде эти материалы являются диэлектриками с удельным сопротивлением  $10^8$  Ом·м и выше. При увлажнении капиллярно-пористые тела могут стать проводниками с удельным сопротивлением  $10^4$  Ом·м. Зависимость электрического сопротивления от влажности для капиллярно-пористых тел (рис. 15.4)

$$R = c/w^n, \quad (15.6)$$

где  $c$  — постоянная;  $w$  — влажность материала;  $n$  — показатель степени.

Как постоянная  $c$ , так и особенно показатель степени  $n$  определяются для каждого материала экспериментально. Степенная зависимость сопротивления от влажности материала обеспечивает высокую чувствительность кондуктометрического метода. Однако его применение ограничено большим числом влияющих величин, таких как температура, структура материала, плотность насыпки, химический состав, наличие электролитов, которые практически позволяют использовать этот метод только в лабораторных условиях.

Емкостный метод основан на том, что изменение влажности капиллярно-пористых тел приводит к существенному изменению их диэлектрической проницаемости. У сухих тел диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 1 \div 6$ , а у воды  $\epsilon = 81$ . Изменение диэлектрической проницаемости вследствие изменения влажности материала определяют, как правило, по изменению емкости конденсатора, между обкладками которого помещается анализируемый материал. Преобразователь емкостного влагомера выполняют в виде двух плоских пластин или двух концентрических цилиндров, пространство между которыми заполняется анализируемым материалом путем засыпки при падении материала с определенной высоты. В этом случае обеспечивается хорошая воспроизводимость результатов измерения. Емкость конденсатора определенных геометрических размеров может быть выражена формулой

$$C = k\epsilon, \quad (15.7)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала, определяемая его влажностью;  $k$  — постоянная, определяемая геометрическими размерами и формой конденсатора.

Включение емкостного преобразователя в высокочастотный колебательный контур позволяет использовать резонансные схемы ламповых или полупроводниковых приборов для измерения емкости преобразователя, а по нему и влажности материала. Емкостные преобразователи мало чувствительны к составу материала, его структуре и контактному сопротивлению между электродами и материалом. Так как для большинства материалов диэлектрическая проницаемость зави-

сит от температуры, в промышленных приборах предусматривается автоматическое введение поправки на изменение температуры. Погрешность емкостных влагомеров может составлять 0,2—0,5 %. Однако методика отбора пробы (заполнение материалом пространства между обкладками конденса-

тора) может влиять на результаты измерения. Например, даже изменение размеров частиц (кусочков) анализируемого материала существенно влияет на показания влагомера. В связи с этим применение влагомеров твердых и сыпучих тел в технических измерениях ограничено.

## Глава шестнадцатая

### АНАЛИЗ СОСТАВА ГАЗОВ

#### 16.1. Общие сведения

Средства измерения, применяемые в различных отраслях промышленности, научных исследованиях для анализа состава газов, называются газоанализаторами. На основе непрерывного автоматического контроля состава газов осуществляется автоматизированное управление химико-технологическими процессами, связанными с получением и использованием газов в металлургии, коксохимическом производстве, нефтепереработке, газовой промышленности. При сжигании органических топлив на тепловых электрических станциях автоматические газоанализаторы используются для контроля за процессом горения и определения требуемого избытка воздуха. Не менее важные функции возложены на приборы газового анализа, работающие в системах, обеспечивающих безопасное функционирование технологических объектов. К числу таких приборов относятся газоанализаторы, измеряющие концентрацию водорода в системе охлаждения турбогенераторов, в газах сдувок аппаратов с радиоактивным теплоносителем на АЭС и т. д.

В последние годы в связи с усилением внимания к охране окружающей среды резко расширилось производство и использование газоанализаторов, предназначенных для контроля содержания вредных примесей в газовых выбросах промышленных предприятий и электрических станций, в воздухе производственных помещений и атмосфере. Так, в соответствии с ГОСТ 17.2.3.01-77 для контроля за качеством воздуха населенных пунктов осуществляется периодическое измерение концентрации таких основных загрязняющих веществ, как сернистый газ, окись углерода, двуокись азота, пыль.

Для измерения концентрации одного из компонентов газовой смеси используется то или иное физико-химическое свойство этого газа, отличающееся от свойств остальных газов. Чем резче это отличие и чем оно специфичнее, тем выше чувствительность метода и проще осуществляется подготовка пробы газа. Разнообразие используемых в газоанализаторах методов измерения обусловлено обширностью анализируемых компонентов газовых смесей и широким диапазоном изменения их концентраций.

подавляющее большинство промышленных автоматических газоанализаторов предназначено для измерения концентрации одного компонента в смеси газов. В этом случае смесь газов рассматривается как бинарная, в которой определяемый компонент влияет на измеряемое физико-химическое свойство смеси, а остальные компоненты, независимо от их состава и концентрации, не влияют и считаются вторым компонентом смеси.

Существуют газоанализаторы, предназначенные для анализа различных составляющих многокомпонентных газовых смесей, в большинстве случаев эти приборы используются в лабораторной практике. Газоанализаторы градуируются в процентах по объему, г/м<sup>3</sup>, мг/л. Первая единица измерения является более удобной, поскольку процентное содержание компонентов газовой смеси сохраняется при изменении температуры и давления. Воспроизведение единиц измерения концентрации компонентов газовых смесей производится с помощью аттестованных эталонных газовых смесей.

Существующая классификация газоанализаторов основывается на физико-химических свойствах, положенных в основу измерения концентрации оп-



едкого калия и предназначен для поглощения  $\text{CO}_2$ , сосуд 4 содержит щелочной раствор пирогаллола для поглощения  $\text{O}_2$ . Поскольку последний раствор поглощает  $\text{CO}_2$ , при проведении анализа вначале определяют содержание  $\text{CO}_2$ , а затем кислорода. Внутренней мерной бюретки находится сообщающаяся с атмосферой трубка 5, которая используется для контроля давления пробы газа после поглощения определяемого компонента. Мерная бюретка термостатирована. Отбор пробы газа и прокачивание его через прибор осуществляются резиновой грушей 6. При прокачивании газа кран 8 находится в положении, показанном на рисунке, напорный сосуд 7 с запирающей жидкостью опущен и газ через трубку 5 выталкивается в атмосферу. При подъеме напорного сосуда 7 запирающая жидкость при достижении конца трубки 5 отсекает от атмосферы пробу газа объемом  $50 \text{ см}^3$ . В двух других положениях крана 8 проба газа в мерной бюретке 1 сообщается с сосудами 3 и 4. Фильтр 10 служит для очистки газа. В качестве запирающей используется жидкость, не поглощающая компоненты анализируемой газовой смеси; часто применяются насыщенные растворы поваренной соли или хлористого кальция.

Для проведения анализа осуществляется следующая последовательность операций. При открытом кране 9, указанном положении трехходового крана 8 и опущенном напорном сосуде 7 грушей 6 несколько раз забирается анализируемый газ и прокачивается через мерную бюретку в атмосферу. Затем при закрытом кране 9 поднимается напорный сосуд 7 и запирающая жидкость отсекает от атмосферы пробу газа. Кран 8 переводится в правое положение, при котором анализируемая проба вытесняется при подъеме напорного сосуда 7 жидкостью из мерной бюретки в сосуд 3. Для улучшения контакта газа с поглощающими жидкостями сосуды заполнены стеклянными трубками. Для полного поглощения  $\text{CO}_2$  осуществляется четыре-пять прокачиваний путем поднятия и опускания напорного сосуда 7.

Для измерения остаточного объема газа из сосуда 3 возвращают пробу в мерную бюретку, плавно опуская напорный сосуд 7. Объем газа фиксируется в момент совпадения уровня в мерной бюретке и внутренней трубке 5. При совпадении этих уровней давление пробы газа равно атмосферному. Нижняя суженная часть мерной бюретки градуируется непосредственно в процентах содержания определяемого компонента. После фиксации содержания  $\text{CO}_2$  в пробе кран 8 переводится в левое положение и запирающей жидкостью оставшаяся часть пробы газа вытесняется в сосуд 4. Для определения содержания  $\text{O}_2$  далее последовательно

проводятся те же операции, что при измерении содержания  $\text{CO}_2$ . О процентном содержании судят по изменению объема оставшейся пробы газа. В процессе измерения нельзя допускать снижения уровня запирающей жидкости ниже конца трубки 5, так как при этом происходит либо подсос воздуха, либо выталкивание части пробы в атмосферу. Если это наблюдалось во время анализа, то опыт необходимо повторить. Продолжительность измерения концентрации двух компонентов составляет 5—8 мин.

Цена деления мерной бюретки ГХП-2 составляет 0,1 мл. При предельной погрешности измерения объема  $\pm 0,1$  мл погрешность в оценке остаточного объема пробы составляет  $\pm 0,2\%$ . Невысокая точность оценки изменения объема не позволяет использовать эти газоанализаторы для измерения малых концентраций.

Более широкими возможностями обладает газоанализатор ВТИ, предназначенный для общего анализа природных и промышленных газов [15]. С его помощью осуществляется измерение следующих компонентов газовой смеси: суммы кислых газов ( $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ );  $\text{O}_2$ ;  $\text{CO}$ ;  $\text{H}_2$ ;  $\text{N}_2$ , суммы предельных углеводородов ( $\text{C}_n\text{H}_m$  в др.); суммы непредельных углеводородов ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ). Конструкция газоанализатора ВТИ отличается от ГХП-2 устройством мерной бюретки и погложительных сосудов, их числом, наличием печи для сжигания  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{C}_n\text{H}_m$ .

К числу достоинств объемного метода измерения концентраций газов относятся: возможность измерения широкого круга компонентов газовой смеси путем подбора соответствующих поглотителей или химических реакций связывания; возможность анализа многокомпонентных газовых смесей; простота устройства.

Недостатками метода являются: низкая точность анализа (не выше 0,1—0,2% общего объема пробы); периодичность действия; необходимость частой замены реактивов; сложность создания на этом принципе автоматических приборов; громоздкость прибора из-за большого числа элементов из стекла.

### 16.3. Тепловые газоанализаторы

В тепловых газоанализаторах измерение концентрации определяемого компонента производится путем измерения тепловых свойств газовой смеси, зависящих от концентрации опре-

Таблица 16.1. Относительные теплопроводности газов при температурах 100 и 500 °С.

Газ	100 °С	500 °С	Газ	100 °С	500 °С
Воздух	1	1	Двуокись серы	0,38	0,53
Азот	0,98	0,97	Кислород	1,02	1,07
Водород	6,84	6,77	Аргон	0,66	0,66
Двуокись углерода	0,71	0,96	Гелий	5,56	5,32
Окись углерода	0,94	0,93	Пары воды	0,78	1,16
Метан	1,45	2,13			

деляемого компонента. Наиболее распространенными приборами этого типа являются газоанализаторы, основанные на измерении теплопроводности смеси (термокондуктометрические) и теплоты, выделяющейся при реакции каталитического окисления определяемого компонента (термохимические). Представители этих групп приборов, как правило, являются автоматическими устройствами, работающими в составе информационно-измерительных и управляющих систем. Тепловые газоанализаторы предназначены для непрерывного анализа состава бинарных смесей.

**Термокондуктометрические газоанализаторы.** В табл. 16.1 приведены теплопроводности различных газов при температурах 100 и 500 °С, относенные к теплопроводности воздуха. Анализ данных, приведенных в табл. 16.1, показывает, что при температуре 100 °С теплопроводность таких газов, как  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CH_4$ ,  $Ar$ ,  $He$ , отличается от теплопроводности воздуха.

С ростом температуры теплопроводность газов возрастает в разной степени, в связи с чем при температуре 500 °С относительная теплопроводность  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $Ar$ ,  $He$  практически не меняется, тогда как у  $CO_2$  близка к единице, а у  $CH_4$  возрастает от 1,45 до 2,13. Характер влияния температуры на относительный коэффициент теплопроводности газов учитывается при выборе температурных режимов работы чувствительных элементов газоанализаторов.

Использование данного принципа измерения основано на том, что между теплопроводностью газовой смеси  $\lambda$ , теплопроводностью  $\lambda_i$  и концентрацией  $c_i$  входящих в ее состав  $n$  компонентов существует близкая к линейной зависимость

$$\lambda = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 + \dots + \lambda_n c_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i c_i \quad (16.3)$$

При анализе бинарных смесей с суммарной концентрацией неопределяемых компонентов  $c_n$ , имеющих совпадающую теплопроводность  $\lambda_n$ , согласно (16.3) теплопроводность смеси определяется выражением

$$\lambda = \lambda_0 c_0 + \lambda_n c_n.$$

Поскольку  $c_n + c_0 = 1$ , зависимость между концентрацией определяемого компонента  $c_0$  и измеряемой теплопроводностью смеси  $\lambda$  при известных теплопроводностях неопределяемых и определяемого компонентов имеет вид

$$c_0 = (\lambda - \lambda_n) / (\lambda_0 - \lambda_n).$$

Если в числе неопределяемых компонентов содержится газ, изменение концентрации которого влияет на теплопроводность смеси, то этот компонент из газовой смеси должен быть удален. Так, в дымовых газах котла, содержащих в основном  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ , водяные пары, при измерении концентрации  $CO_2$  должны быть удалены  $SO_2$ ,  $H_2$ , водяные пары. Колебания концентрации других компонентов не влияют, так как обладают близкими к азоту теплопроводностями.

Для измерения теплопроводности газовой смеси используется нагреваемый током проводник, помещенный в камеру, заполненную анализируемой смесью. Если теплоотдача от проводника к стенкам камеры в основном осуществляется в результате теплопроводности, то имеет место следующая зависимость:

$$Q = 2\pi l \lambda (t_n - t_c) / \ln(D/d),$$

где  $Q$  — количество теплоты, отдаваемой проводником в секунду;  $l$ ,  $d$  — длина и диаметр проводника;  $D$  — диаметр камеры;  $\lambda$  — теплопроводность

смеси газов;  $t_n$ ,  $t_c$  — температуры проводника и стенок камеры.

При постоянстве отдаваемой проводником теплоты  $Q$  и температуры стенок камеры  $t_c$ , зависящей от температуры окружающей среды, теплопроводность газовой смеси будет однозначно определять температуру проводника, а следовательно, и его сопротивление. В качестве проводника используется проволока из металла, обладающего высоким температурным

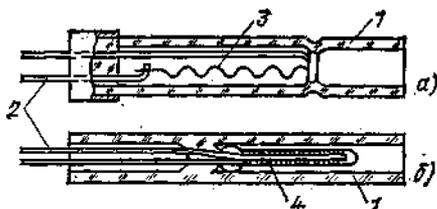


Рис. 16.2. Устройство рабочих чувствительных элементов с открытой (а) и остеклованной (б) платиновой спиралью

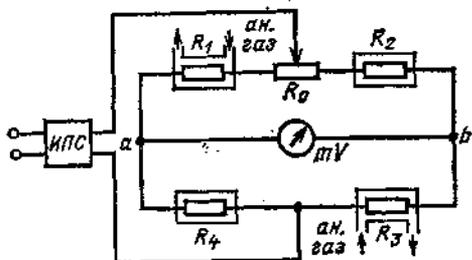


Рис. 16.3. Измерительная мостовая схема газоанализатора

коэффициентом электрического сопротивления и химической стойкостью; чаще применяют платину, реже вольфрам, никель, тантал.

Схема двух типов рабочих чувствительных элементов из платиновой проволоки представлена на рис. 16.2. В стеклянном корпусе 1 к платиновым токоподводам 2 диаметром 0,15 мм подпаяна открытая платиновая спираль 3 диаметром 0,02 мм (рис. 16.2, а) либо остеклованная 4 с диаметром 0,02 мм (рис. 16.2, б). В первом случае сопротивление чувствительного элемента составляет 10 Ом, во втором 40 Ом. Чувствительный элемент второго типа защищен от агрессивных воздействий среды, но ему присуща большая инерционность.

Для обеспечения максимальной чувствительности по теплопроводности для газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , а также снижения влияния теплоотдачи за счет излу-

чения температура платиновой спирали устанавливается 80—100°C. С целью уменьшения влияния конвективного теплообмена газ к чувствительному элементу подается вследствие диффузионного обмена, что увеличивает инерционность тепловых газоанализаторов.

Для измерения сопротивления проводочных чувствительных элементов используются мостовые схемы. Одна из наиболее простых и распространенных измерительных схем газоанализатора (рис. 16.3) представляет собой неуравновешенный мост, питаемый постоянным током от батарей или источника стабилизированного питания (ИПС). Резисторы  $R_1$  и  $R_3$  выполнены из платиновой проволоки и находятся в камерах, заполненных анализируемым газом. Резисторы  $R_2$  и  $R_4$  находятся в герметичных камерах, заполненных неопределяемыми компонентами смеси или воздухом. Конструкция сравнительных чувствительных элементов аналогична конструкции рабочих элементов, представленных на рис. 16.2, только правый конец стеклянной трубки в них запаян.

Если показывающий прибор, включенный в измерительную диагональ моста  $ab$ , имеет безнулевую шкалу, то в камерах с резисторами  $R_2$  и  $R_4$  находятся неопределяемые компоненты с концентрацией определяемого компонента, соответствующей нижнему пределу измерения прибора. Входящий в мост переменный резистор  $R_0$  служит для устранения начального небаланса моста, когда резисторы  $R_1$ — $R_4$  находятся в камерах с одинаковым составом газовых смесей.

Модификацией рассмотренной схемы являются одноступенчатые схемы, содержащие одно рабочее плечо, плечо сравнения и два постоянных сопротивления. В обоих случаях мосты могут быть уравновешенными и неуравновешенными. Рассмотренные типы измерительных схем имеют термокондуктометрические газоанализаторы типа ТКГ, ГЭД, ГЭУК, предназначенные для анализа содержания  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$  в топочных газах и газах производства аммиака, хлора, аргона, серной кислоты. Время установления показаний приборов достигает 120 с, предельная погрешность измерения  $\pm 5\%$  нормирующей концентрации определяемого компонента.

Одномостовой измерительной схеме присущи недостатки, обусловленные влиянием на сигнал небаланса моста колебаний напряжения питания и температуры окружающей среды. Для снижения влияния этих факторов используются источники стабилизированного питания, термостатирование и более сложные измерительные схемы газоанализаторов. На рис. 16.4 представлена упрощенная схема газоанализаторов по теплопроводности типа ТП. Схема включает два моста: рабочий 1 и сравнения 2. Рабочий мост аналогичен неуравновешенному мосту, изображенному на рис. 16.3. Резисто-

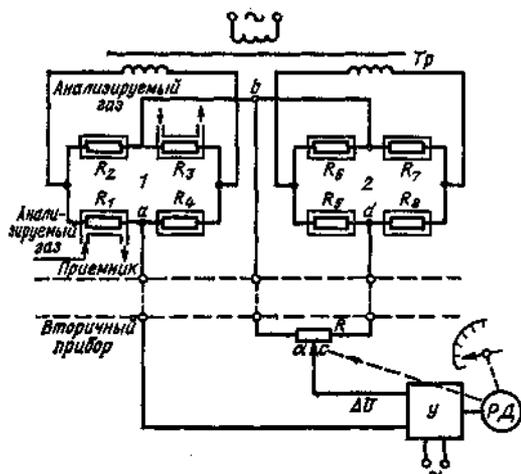


Рис. 16.4. Схема автоматического газоанализатора по теплопроводности

ры  $R_1$  и  $R_3$  омываются анализируемым газом, а  $R_2$  и  $R_4$  находятся в камерах сравнения. Сигнал небаланса рабочего моста  $U_{ab}$  зависит от концентрации определяемого компонента в смеси газов. Для измерения сигнала используется компенсационный метод измерения. Источником компенсирующего сигнала служит мост сравнения 2. Оба моста питаются переменным напряжением от одного трансформатора  $Tr$ . Резисторы моста сравнения  $R_6$ ,  $R_8$  подобно  $R_2$ ,  $R_4$  находятся в камерах с концентрацией определяемого компонента, соответствующей нижнему пределу измерения прибора,  $R_5$  и  $R_7$  — в камерах с концентрацией, соответствующей верхнему пределу. Таким образом, мост сравнения развивает сигнал небаланса  $U_{ba}$ , равный максимальному сигналу рабочего моста. Последний имеет место, когда в смеси

анализируемого газа концентрация определяемого компонента достигает верхнего предельного значения.

Для получения сигнала компенсации используется реохорд вторичного прибора, который подключается к измерительной диагонали моста сравнения. Вторичными приборами в газоанализаторах служат автоматические уравновешенные мосты типа КСМ и КПМ.

Сигнал рабочего моста компенсируется долей сигнала моста сравнения. Поскольку внешние факторы: температура окружающей среды, колебания напряжения питания — влияют на сигналы обоих мостов, эта схема менее чувствительна к их изменениям, чем рассмотренная выше.

С использованием двухмостовой измерительной схемы отечественной промышленностью выпускаются тепловые газоанализаторы типа ТП для анализа содержания  $CO_2$  в дымовых газах и сложных газовых смесях,  $H_2$  в технологических газах и системе водородного охлаждения турбогенераторов. Предельная погрешность измерения концентрации у этих приборов составляет  $\pm 2,5; 3\%$ , время установления показаний достигает 1—3 мин.

**Термохимические газоанализаторы.** В термохимических газоанализаторах концентрация определяемого компонента измеряется по количеству теплоты, выделившейся при реакции каталитического окисления. В число определяемых по этому методу газов входят  $CO$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ . Термохимические газоанализаторы разделяются на две группы. В первой группе, имеющей более низкую чувствительность, реакция окисления происходит на поверхности нагретой платиновой нити, играющей роль катализатора. Температура платиновой нити, а следовательно, и ее сопротивление меняются с изменением количества теплоты, выделившейся при окислении определяемого компонента. Платиновая нить с сопротивлением  $R_1$  включается в плечо неуравновешенного моста, схема которого аналогична представленной на рис. 16.3. В этот мост входит резистор  $R_2$ , выполненный из платиновой проволоки подобно резистору  $R_1$ , но находящийся в камере, заполненной неопределяемыми компонентами газовой смеси. Резисторы  $R_3$  и  $R_4$  имеют постоянное сопротивление и вы-

полнены из манганиновой проволоки.

При наличии определяемого компонента в газовой смеси и его сгорании сопротивление резистора  $R_1$  возрастает и милливольтметр (потенциометр), включенный в измерительную диагональ моста, покажет наличие разности напряжений, пропорциональной концентрации определяемого компонента. Милливольтметр градуируется в единицах концентрации определяемого компонента. Время установления показаний приборов этого типа составляет 1 мин при предельной погрешности, достигающей  $\pm 1\%$ .

Газоанализаторы первой группы в основном используются как индикаторы и сигнализаторы взрывоопасных концентраций газов и выполняются в переносном варианте, к их числу относятся сигнализаторы СГГ, измеряющие концентрацию  $H_2$  в воздухе.

В термохимических газоанализаторах второй группы реакция окисления определяемого компонента протекает на поверхности гранулированного катализатора, в качестве которого часто используется голкалит (60% двуокиси марганца и 40% окиси меди). Наличие развитой поверхности катализатора обеспечивает возможность измерения концентраций определяемого компонента, составляющих доли процента. Количество выделившейся при сжигании теплоты измеряется платиновым термометром сопротивления или батареей термопар.

Газоанализаторы второго типа являются более инерционными, время установления их показаний достигает 5 мин, предельная погрешность составляет  $\pm 5-7\%$ .

#### 16.4. Магнитные газоанализаторы

В магнитных газоанализаторах, относящихся к анализаторам бинарных смесей, концентрация определяемого

компонента измеряется по изменению магнитных свойств газовой смеси. Газы по их магнитной восприимчивости делятся на парамагнитные, втягиваемые в магнитное поле, и диамагнитные, выталкиваемые из него. Наибольшей магнитной восприимчивостью обладает кислород, относящийся к парамагнитным газам. В табл. 16.2 приведены значения относительной объемной магнитной восприимчивости для газов, причем знак минус относится к диамагнитным газам [1].

Сопоставление данных, приведенных в табл. 16.2, показывает, что газы, кроме кислорода, окиси и двуокиси азота, являются практически немагнитными, поскольку их объемная магнитная восприимчивость на два порядка ниже, чем у кислорода. Таким образом, магнитные свойства газовой смеси определяются концентрацией кислорода, поскольку  $NO$  и  $NO_2$ , являющиеся продуктами высокотемпературных окислительных реакций, встречаются редко и в малых концентрациях.

Объемная магнитная восприимчивость кислорода  $\chi$  связана с удельной магнитной восприимчивостью  $\chi_1$  и плотностью  $\rho$  зависимостью  $\chi = \chi_1 \rho$ ; поскольку  $\chi_1 = C/T$ , а  $\rho = PM/TR$ ,

$$\chi = CPM/(T^2R), \quad (16.4)$$

где  $C$  — постоянная Кюри;  $P$ ,  $T$  — абсолютное давление и температура кислорода с молекулярной массой  $M$ ;  $R$  — газовая постоянная.

Таким образом, магнитная восприимчивость кислорода зависит от давления и снижается с ростом температуры пропорционально  $1/T^2$ .

Объемная магнитная восприимчивость смеси газов определяется соотношением

$$\chi_{см} = \sum_{i=1}^n c_i \chi_i = c_n \chi_n + (1 - c_n) \chi_n, \quad (16.5)$$

Таблица 16.2. Относительная объемная магнитная восприимчивость газов

Газ	Относительная объемная магнитная восприимчивость	Газ	Относительная объемная магнитная восприимчивость
Кислород $O_2$	1	Водород $H_2$	-0,0011
Воздух (21 % $O_2$ )	0,211	Азот $N_2$	-0,004
Окись азота $NO$	0,363	Двуокись углерода $CO_2$	-0,0057
Двуокись азота $NO_2$	0,0616	Аммиак $NH_3$	-0,0057
Метан $CH_4$	-0,0123	Водяные пары $H_2O$	-0,004

где  $c_i, \chi_i$  — объемные концентрации компонентов газовой смеси и их объемные магнитные восприимчивости;  $c_{\text{к}}, \chi_{\text{к}}$  — объемная концентрация кислорода и его магнитная восприимчивость;  $\chi_{\text{н}}$  — усредненная магнитная восприимчивость неопределяемых компонентов.

В соответствии с (16.5), поскольку  $\chi_{\text{н}} \ll \chi_{\text{к}}$ , изменение объемной магнитной восприимчивости газовой смеси однозначно определяется концентрацией кислорода при условии стабилизации температуры и давления.

Существует несколько методов измерения магнитной восприимчивости смеси газов, наиболее распространенный из них связан с использованием явления термомагнитной конвекции. Последняя представляет собой движе-

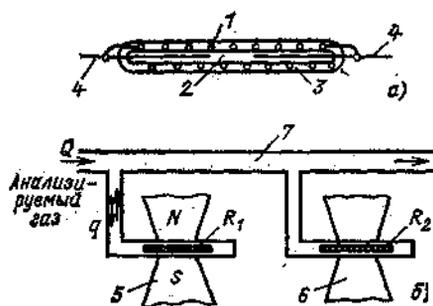


Рис. 16.5. Схема чувствительного элемента кислородомера с внешней магнитной конвекцией

ние кислородсодержащего газа в неоднородном магнитном и тепловом полях. Основанные на этом эффекте газоанализаторы, выпускаемые в СССР и за рубежом, выполняются с одномотовой или двухмотовой измерительными схемами.

На рис. 16.5, а представлены схема чувствительного элемента, применяемого в отечественных газоанализаторах типа МН, и размещение его между полюсами магнита (рис. 16.5, б). Чувствительный элемент представляет собой платиновую проволоку 1 диаметром 0,02 мм, намотанную на стеклянный капилляр 2 и остеклованную с внешней стороны. 3. Концы спирали подпаяны к тоководам 4. Наружный диаметр чувствительного элемента составляет 0,5—0,6 мм, сопротивление резистора 40 Ом. Кислородсодержащий газ, протекающий по трубке 7, втягивается в магнитное поле, при этом он нагревается от резистора  $R_1$

и его магнитная восприимчивость снижается. Холодный газ выталкивает нагретый, создавая поток магнитной конвекции  $q$ , охлаждающий резистор  $R_1$ . Резистор  $R_2$  для обеспечения одинаковых условий теплоотдачи размещен внутри немагнитного медного блока 6, имеющего ту же конфигурацию, что и постоянный магнит 5. На рис. 16.5, б направления тепловой и магнитной конвекции совпадают, при размещении крышки с линиями подвода газа 7 под магнитом направления конвекций становятся встречными.

В газоанализаторах МН используется двухмотовая измерительная схема, представленная на рис. 16.6. В первичном преобразователе (приемнике) размещены два моста, питаемых от вторичных обмоток 1, 2 силового транс-

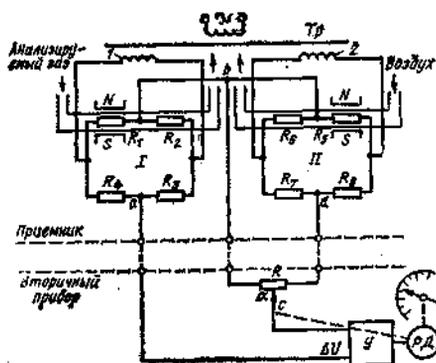


Рис. 16.6. Схема автоматического магнитного газоанализатора типа МН

сформатора  $Tr$ . Мост 1 является рабочим, его резисторы  $R_1, R_2$ , представляющие собой платиновые чувствительные элементы с внешним теплообменом, омываются анализируемым газом. Резистор  $R_1$  находится в неоднородном магнитном поле,  $R_2$  — между полюсами ложного магнита (медного блока). Резисторы  $R_3, R_4$  являются постоянными и выполнены из манганиновой проволоки.

При наличии кислорода в смеси газов мост 1 работает в неравновесном режиме и напряжение в измерительной диагонали  $U_{ab}$  зависит от концентрации кислорода. Для проверки начальной точки шкалы вторичного прибора приемник снабжается металлическим шунтом. При его опускании снимается магнитное поле, резисторы  $R_1$  и  $R_2$  попадают в одинаковые условия и мост I должен быть уравновешен. В схему

моста включен переменный резистор начальной балансировки, не показанный на схеме, аналогичный резистору  $R_0$ , включенному в мост, и представленный на рис. 16.3.

Мост II является мостом сравнения. Его плечи  $R_5$  и  $R_6$ , выполненные из платиновой проволоки, омываются воздухом, причем  $R_6$ , как и  $R_2$  находится между полюсами ложного магнита. Резисторы  $R_7$  и  $R_8$  выполнены подобно  $R_3$  и  $R_4$  из марганциновой проволоки. Поскольку концентрация кислорода в воздухе является стабильной, мост II разбивает постоянный сигнал небаланса  $U_{bd}$ . Колебания  $U_{bd}$  обусловлены только отклонениями напряжения питания, температуры и давления окружающей среды.

Для измерения сигнала рабочего моста используется компенсационный метод, причем сигналом компенсации служит доля напряжения моста сравнения, снимаемая с реохорда,  $U_{bc} = \alpha U_{bd}$ , где  $\alpha$  изменяется от 0 до 1. Компенсация сигнала рабочего моста долей сигнала моста сравнения осуществляется автоматически, в качестве вторичного прибора используется автоматический уравновешенный мост с некоторыми изменениями в измерительной схеме.

В газоанализаторах с двухмостовой измерительной схемой влияние колебаний напряжения питания, температуры окружающей среды на показания прибора меньше, чем в приборах с одномостовой измерительной схемой. Это объясняется одновременным влиянием перечисленных факторов на сигналы рабочего и сравнительного мостов.

Кислородомеры типа МН-5106 имеют пределы измерения 0—10 %  $O_2$  при предельной погрешности измерения  $\pm 0,25$  %  $O_2$ , МН-5130 при нулевом нижнем пределе измерения имеют верхние 0,5; 1; 2; 5; 10; 21; 50 %, при этом предельная погрешность зависит от диапазона измерения и находится в пределах от  $\pm 2$  до  $\pm 10$  % нормирующего значения. Последняя цифра соответствует минимальному диапазону измерения прибора. Кислородомеры МН могут иметь безнулевую шкалу с пределами измерения 50—100 %  $O_2$ , 80—100 %  $O_2$ . Время установления выходного сигнала находится в пределах 0,5—1,5 мин.

Благодаря резкому отличию магнитной восприимчивости кислорода от вос-

приимчивости других газов не требуется предварительного удаления неопределяемых компонентов. Тем не менее целью защиты чувствительных элементов установка газоанализатора должна включать в себя фильтр для очистки пробы от сернистого газа, если последний содержится в ней. Остальные вспомогательные элементы установки газоанализатора являются типовыми и будут рассмотрены в конце главы.

## 16.5. Оптические газоанализаторы

В оптических газоанализаторах концентрация определяемого компонента измеряется по изменению оптических свойств газовой смеси, к числу которых относятся показатели преломления, спектрального поглощения и излучения, спектральная плотность и т. д. Наиболее распространенными являются три группы оптических газоанализаторов: 1) инфракрасного и ультрафиолетового поглощения; 2) спектрофотометрические; 3) фотокolorиметрические. Оптические газоанализаторы обладают большой разрешающей способностью, благодаря чему они применяются для анализа микроконцентраций взрывоопасных и токсичных примесей в промышленных газах, при контроле воздуха в атмосфере и производственных помещениях.

Газоанализаторы инфракрасного и ультрафиолетового поглощения. Каждый газ характеризуется определенным спектром поглощения. Газы, содержащие в своем составе два и более разнородных атомов, такие как  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $C_2H_2$ , имеют спектры поглощения в инфракрасной области. Одноатомные газы характеризуются линейчатыми спектрами поглощения, лежащими в ультрафиолетовой области.

Закон Ламберта — Бера определяет связь ослабления монохроматического излучения при прохождении через камеру, заполненную анализируемым газом, с его концентрацией:

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \exp(-\epsilon_\lambda cL),$$

$$D_\lambda = \epsilon_\lambda cL = \ln(I_{0\lambda} / I_\lambda),$$

где  $I_{0\lambda}$ ,  $I_\lambda$  — интенсивность монохроматического излучения на входе и выходе камеры длиной  $L$ , заполненной определяемым компонентом с концен-

ацией  $s$  и коэффициентом спектрального поглощения  $\epsilon_\lambda$ ;  $D_\lambda$  — оптическая плотность смеси газов.

Для использования этого метода измерения необходимо, чтобы определяемый компонент имел спектр поглощения, отличающийся от спектров поглощения других компонентов анализируемой смеси. Лежащие в инфракрасной области спектры поглощения  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{CH}_4$  изображены на рис. 16.7. Спектры  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  частично перекрываются.

Схема приемника инфракрасного излучения представлена на рис. 16.8.

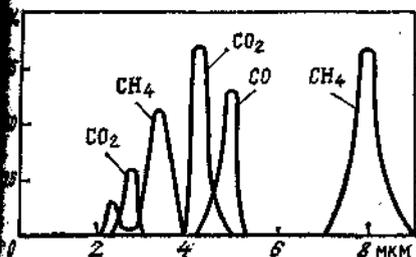


Рис. 16.7. Спектры поглощения  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  в инфракрасной области

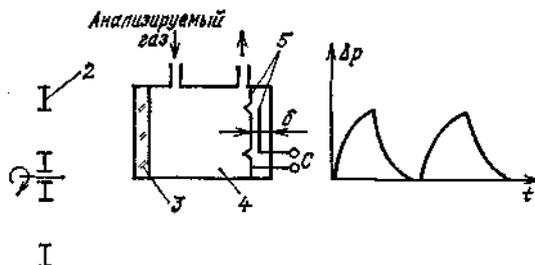


Рис. 16.8. Принципиальная схема оптико-акустического лучеприемника

Источником 1 создается постоянное излучение, которое с помощью вращающегося диска с отверстиями (обтюратора) 2 и светофильтра 3 преобразуется в пульсирующее монохроматическое излучение. Анализируемый компонент, находящийся в камере 4, поглощает излучение, при этом в камере возникают пульсации температуры, а следовательно, и давления, изображенные на том же рисунке.

Пульсации давления в камере воспринимаются микрофонным чувствительным элементом 5, представляющим собой конденсатор, образованный подвижной мембраной и неподвижной пластиной. Под действием давления мембрана перемещается, вызывая изменения емкости конденсатора  $C$  вследствие изменения зазора  $\delta$ . В связи с тем что в первых газоанализаторах такого типа обтюрация светового потока производилась со звуковыми частотами, приборы получили название оптико-акустических. Это название сохранилось, несмотря на то что современные приборы работают на более высоких частотах.

Промышленные оптико-акустические газоанализаторы имеют сложные измерительные

схемы, как правило, двухканальные. Схема газоанализатора типа ОА представлена на рис. 16.9. От источников излучения 1 потоки пульсирующего инфракрасного излучения  $q, q'$  через обтюратор (прерыватель) 2 поступают в два оптических канала: рабочий I и сравнения II. Оба канала содержат фильтровые камеры 3, заполненные неопределяемым компонентом, имеющим спектр поглощения, частично перекрывающий спектр поглощения анализируемого газа. Введение фильтровых камер, заполненных газом с близким спектром поглощения, позволяет устранить из потока излучения ту часть длин волн, интенсивность которых зависела бы от концентрации неопределяемого компонента.

Первый оптический канал включает рабочую камеру 4, через которую протекает анализируемый газ. Вследствие поглощения излу-

чения в рабочей камере на ее выходе световой поток  $q_1$  меньше потока  $q_2$  в канале сравнения. Поскольку в приборе используется компенсационный метод измерения, сравнительный канал II включает в себя компенсационную камеру 6, заполненную определяемым компонентом. Внутри камеры 6 находится подвижный поршень, передняя грань 7 которого является отражающей поверхностью. Длина пути потока  $q_1$  внутри камеры 6, а следовательно, и его ослабление зависит от положения поршня. Потоки  $q_2$  и  $q_1$  поступают в лучеприемник 5, заполненный анализируемым компонентом и содержащий конденсаторный преобразователь микрофонного типа.

Стенки камер 3—6 по ходу потоков излучения выполнены из светофильтров, имеющих полосу пропускания, соответствующую спектру поглощения анализируемого компонента. При равенстве потоков  $q_1$  и  $q_2$  пульсации давления в обеих частях лучеприемной камеры 5 происходят с одинаковой амплитудой, не вызывая изменения емкости конденсатора. При увеличении концентрации определяемого компонента поток  $q_1$  уменьшается, при этом снижается амплитуда пульсаций давления в правой половине камеры 5 и конденсатор изменяет свою емкость. На выходе усилителя появляется сигнал, вызывающий вращение реверсивного двигателя РД. Последний перемещает цилиндр 7, увеличивая длину пути потока  $q_1$  и снижая  $q_2$  до восстановления равенства потоков. Положение цилиндра компенсирующей камеры, однозначно зависящее от концентрации анализируемого компонента, определяет положение движка реохорда  $R$  и свя-

занного с ним указателя вспомогательной шкалы приемника.

В качестве вторичного прибора используется автоматический уравновешенный мост. Оптические газоанализаторы типа ОА, предназначенные для измерения концентраций  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  в газовых смесях, имеют при нулевом нижнем верхние пределы измерения 1; 2; 5; 10; 20; 30; 50; 70; 100 %, предельная погрешность газоанализаторов составляет  $\pm 2,5$  % диапазона измерения.

Рассмотренный способ компенсации потока излучения, прошедшего через рабочую камеру, называется газовым. Существуют другие способы компенсации, связанные с изменением мощности источника излучения во втором канале либо с введением ослабляющего светофильтра во второй канал. Эти методы называются соответственно электрической и оптической компенсацией.

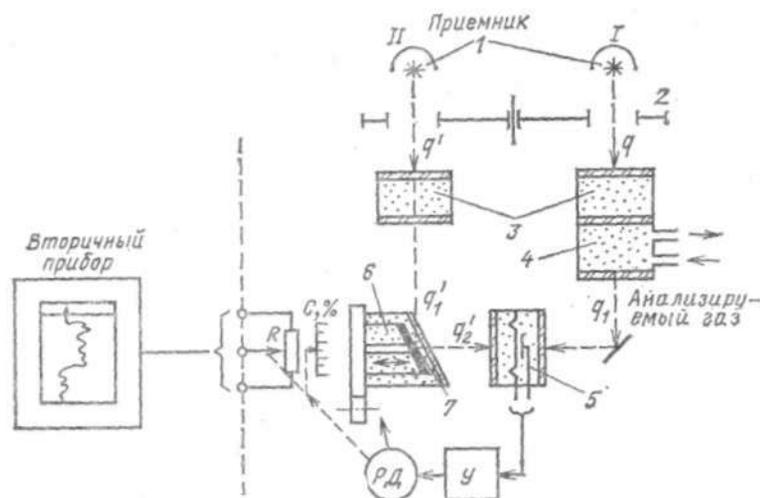


Рис. 16.9. Схема автоматического оптико-акустического газоанализатора типа ОА

Погрешность измерения концентрации двухканальными газоанализаторами существенно зависит от симметрии оптических каналов, изменения излучательной характеристики источников световых потоков, загрязнения светофильтров. В связи с этим существует ряд модификаций газоанализаторов с одноканальными измерительными схемами.

Отечественной и зарубежной промышленностью выпускаются автоматические системы газового анализа, включающие помимо оптического газоанализатора термокондуктометрические или термохимические, рассмотренные в § 16.3. К числу таких систем относятся АСГА-Д, АСГА-М, АСГА-Т, ГАК, предназначенные соответственно для анализа отходящих газов доменных печей, конвертеров, отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, колосниковых газов. С помощью этих систем производится измерение

таких компонентов, как  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{CH}_4$ .

Большинство газов и паров обладают способностью поглощать ультрафиолетовое излучение, однако ограниченное число их обладает спектрами поглощения, отличными от других газов. Газоанализаторы, основанные на поглощении определенными компонентами ультрафиолетового излучения, применяются для измерения наличия в воздухе токсичных паров ртути, хлора, карбонила никеля. В приборах в качестве источников ультрафиолетового излучения используются ртутные лампы. Схемы могут быть как одноканальными, так и двухканальными.

В качестве приемников излучения на выходе рабочих и фильтровых камер используются фоторезисторы, вакуумные фотоэлементы и фотоумножители.

**Фотоколориметрические<sup>1</sup> газоанализаторы.** В фотоколориметрических газоанализаторах концентрация определяемого компонента в соответствии с законом Ламберта—Бера измеряется по изменению оптической плотности индикаторного раствора, окраска которого избирательно меняется в присутствии определяемого компонента.

Фотоколориметрический метод характеризуется универсальностью, поскольку один и тот же прибор с различными индикаторными растворами может использоваться для анализа разнообразных компонентов газовой смеси. Он отличается также высокой избирательностью, зависящей от специфичности реакции, протекающей между анализируемым компонентом и индикаторным раствором. Возможность накопления определяемого компонента в индикаторном растворе обеспечивает высокую чувствительность метода. Основанные на этом принципе приборы применяются для

<sup>1</sup> От слова colour (англ.) — цвет, краска.

контроля состояния воздушного бассейна, они измеряют концентрацию в воздухе таких вредных примесей, как  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  [16]. Приборы имеют верхний предел измерения от 0,0005 до 0,02 мг/л в зависимости от анализируемого компонента. Поскольку фотоколориметрические приборы чаще используются для анализа состава жидкостей, их принцип действия подробно рассматривается в § 17.9.

## 16.6. Хроматографические газоанализаторы. Общие сведения

Хроматографические газоанализаторы предназначены для анализа многокомпонентных газовых смесей. В последние годы эти приборы стали применяться для анализа состава жидкостей и твердых тел. Хроматографы являются приборами периодического действия, более сложными по устройству, чем рассмотренные выше газоанализаторы.

Процесс измерения в этих приборах распадается на две стадии: хроматографическое разделение газовой смеси на отдельные компоненты и идентификация (детектирование) компонентов, включающая качественный и количественный их анализ. Хроматографическое разделение смеси на отдельные компоненты, открытое в 1903 г. М. С. Цветом, осуществляется за счет различной скорости движения газов вдоль слоя сорбента, обусловленной характером внешних и внутренних межмолекулярных взаимодействий. В настоящее время по возможностям разделения и анализа многокомпонентных смесей хроматография не имеет конкурирующих методов. Хроматографию можно использовать для анализа низкокипящих газов, смесей летучих и термически стойких твердых и жидких веществ, температура кипения которых достигает  $500^\circ\text{C}$  и выше. К числу преимуществ этого метода относится также высокая чувствительность (достигающая при использовании ионизационных детекторов  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  мг/мл) в сочетании с малым объемом отбираемой пробы, сравнительно высокой точностью и малым временем анализа.

Существует три разновидности хроматографического метода измерения, различающиеся способом перемещения анализируемой смеси: проявительный, фронтальный и вытеснительный. Первый метод является наиболее распространенным. В его рамках различают следующие разновидности, обусловлен-

ные процессом разделения смеси на компоненты: газоадсорбционный, газожидкостный (распределительный) и капиллярный. Последний является разновидностью газожидкостного способа разделения.

Принципиальные схемы хроматографа и разделения смеси газов в колонке представлены на рис. 16.10, а, б. Из баллона 1 газ-носитель поступает в хроматограф. Для поддержания в процессе его работы постоянной скорости используется регулятор 2, содержащий редуктор, манометр и измеритель расхода газа.

В газ-носитель дозатором 3 периодически вводится проба анализируемого газа. В разделительной колонке 4, заполненной твердым или жидким сорбентом, анализируемая смесь разделяется на компоненты. Вдоль слоя сор-

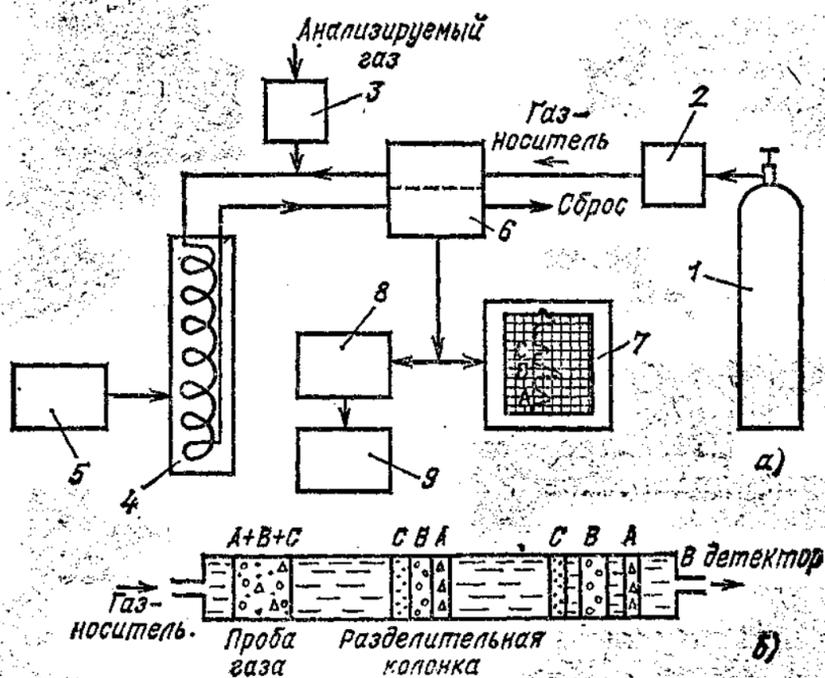


Рис. 16.10. Принципиальная схема газового хроматографа

бента с большей скоростью движутся наименее сорбируемые газы. Поэтому в пробе смеси газов (рис. 16.10, б), содержащей три компонента А, В и С, первым выносятся наименее сорбируемый газ А, а последним — хорошо сорбируемый С. После разделения каждый компонент с газом-носителем образует бинарную смесь, анализ которой может быть произведен различными методами, в том числе рассмотренными выше и реализуемыми в детекторе 6. Поскольку в процессе измерения свойства газа-носителя могут меняться, при пропускании последнего через детектор фиксируются изменения его свойств, вызванные присутствием компонента анализируемой смеси.

Для улучшения разделения компонентов температурный режим колон-

ки может меняться с помощью терморегулятора 5 с программным управлением. Выходной сигнал детектора 6 подается на регистрирующий прибор 7, интегрирующее 8 и цифрорпечатающее 9 устройства. На диаграмме самопишущего прибора 7 выход каждого из компонентов сопровождается пиком, площадь которого зависит от концентрации этого газа. График, фиксирующий выход компонентов, называют хроматограммой. Использование интегрирующего и цифрорпечатающего устройств, вычислительной машины автоматизирует обработку хроматограмм и позволяет ввести информацию о составе газов в АСУ ТП.

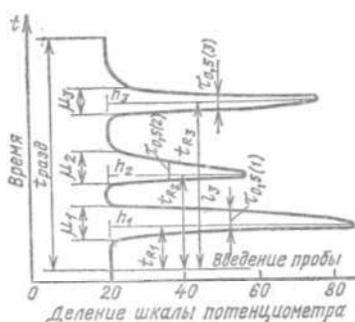


Рис. 16.11. Хроматограмма разделения смеси трех компонентов

Хроматограмма (рис. 16.11) является носителем как качественной информации — о виде компонентов смеси, так и количественной — об их концентрации. Значение последней определяется площадью пика или его высотой. Поскольку разделение газов осуществляется за счет их различных сорбционных свойств, время выхода того или иного компонента при постоянной скорости газа-носителя определяет вид газа. Эта характеристика называется временем удерживания  $t_R$ . Она численно равна интервалу времени от момента ввода пробы газа до момента, соответствующего максимуму пика. Более устойчивой характеристикой, не зависящей от колебаний скорости  $v$  газа-носителя, является удерживаемый объем газа-носителя

$$V_R = t_R v.$$

Время удерживания, как и ширина пика, может выражаться в единицах времени  $t_R$ ,  $\tau$  и единицах длины  $l$ ,  $\mu$ , измеренных по диаграммной ленте. Ширина пика определяется у его ос-

нования  $\tau$ ,  $\mu$  или на половине высоты  $\tau_{0,5}$ ,  $\mu_{0,5}$ . Отношение к последним величинам времени удерживания характеризует эффективность газохроматографической колонки:

$$n = 5,545 \left( \frac{t_R}{\tau_{0,5}} \right)^2 = 5,545 \left( \frac{l}{\mu_{0,5}} \right)^2.$$

Эффективность разделения двух компонентов газовой смеси определяет такой показатель, как степень разделения

$$R = (t_{R_1} - t_{R_2}) / (\tau_{0,5_1} + \tau_{0,5_2}).$$

Порог чувствительности хроматографа рассчитывается по формуле  $\Delta = 2acVu / (QS)$ , где  $2a$  — удвоенная амплитуда высокочастотных колебаний нулевой линии хроматографа;  $c$  — концентрация определяемого компонента;  $V$  — объем дозы;  $u$  — скорость движения диаграммной ленты;  $Q$  — расход газа-носителя через детектор;  $S$  — площадь пика хроматограммы. Порог чувствительности может быть рассчитан и по другому определяющему параметру — высоте пика.

Хроматографическое разделение — сложный процесс, составляющими которого являются сорбция, десорбция, диффузия. Последняя, сопровождая процесс разделения, вызывает размытие пиков и ухудшает качество разделения.

Особенностью хроматографического метода анализа является влияние на результаты измерения большого числа взаимосвязанных факторов, которые можно разделить на пять групп:

- 1) параметры, характеризующие работу разделительной колонки; геометрия колонки (длина, диаметр, форма), материал колонки, природа сорбента, его пористость, зернение, характер набивки, толщина жидкой пленки, температурный режим колонки;
- 2) параметры, связанные с газом-носителем: природа и наличие примесей, скорость и давление;
- 3) параметры, связанные с работой дозатора: объем пробы, его стабильность, способ ввода пробы;
- 4) параметры, связанные с работой детектора: чувствительность, инерционность, линейность градуировочной характеристики, стабильность;
- 5) параметры, обусловленные способом регистрации выходного сигнала детектора и методом обработки хро-

матограммы: погрешность, инерционность, чувствительность вторичного прибора, скорость движения диаграммной бумаги, погрешность расчета качественных и количественных показателей хроматографического разделения.

Остановимся более подробно на элементах хроматографов и влиянии перечисленных выше параметров.

### 16.7. Элементы газовых хроматографов

*Разделительные колонки.* Одним из основных факторов, влияющих на эффективность  $n$  и степень разделения  $R$ , является длина колонки. Оба показателя возрастают с увеличением длины, но при этом растет перепад давления на колонке, а скорость газа-носителя по длине резко меняется. С учетом роста сопротивления и неудобства работы с длинными колонками последние обычно имеют длину 1—5 м. Длина колонок капиллярных хроматографов достигает 300 м.

Поскольку колонки размещаются в термостатах, их изготавливают в виде U-образных или спиральных трубок. Последние широко применяются в промышленных хроматографах, хотя в первых легче осуществляется плотная и однородная набивка, меньше размытость пиков из-за неоднородности скоростей газа по сечению трубки.

Внутренний диаметр набивных колонок составляет 0,5—5 мм. В капиллярных хроматографах, в которых жидкий сорбент наносится непосредственно на внутреннюю поверхность трубки, их внутренний диаметр составляет 0,15—0,5 мм.

Колонки изготавливаются из металлических, стеклянных и фторопластовых трубок, последние используются при комнатных температурах разделения газов. При этих температурах производится разделение в газо-адсорбционной хроматографии, в газожидкостной широко используется программированное изменение температуры.

В качестве неподвижной фазы в газо-адсорбционной хроматографии применяются следующие вещества, имеющие развитую пористость: активированный уголь, силикагель, алюмогель, природные и синтетические цеолиты.

Размер зерен адсорбентов составляет 0,1—0,8 мм.

Жидкие сорбенты отличаются большим разнообразием по сравнению с твердым. В качестве первых используются вазелиновое, авиационное и силиконовое масла, фталаты, полиэтиленгликоль.

В насадочных колонках жидкость наносится на поверхность твердого нейтрального носителя, обладающего макропористостью. Размеры частиц составляют 0,25—0,5 мм. В качестве носителей используется инзенский, дмитровский или диатомитовый кирпич. Для нанесения жидкую фазу растворяют в метаноле или ацетоне, которые затем испаряют. Носитель, покрытый жидкостью, является сыпучим, и заполнение им колонок производится так же, как и твердым сорбентом. Капиллярные колонки заполняются растворенным жидким сорбентом, для проталкивания его через капиллярную трубку используется избыточное давление. После заполнения растворитель испаряют.

Газожидкостные хроматографы по сравнению с адсорбционными характеризуются большей стабильностью, в них редко происходят необратимые реакции, а компоненты, не выходящие из колонок, можно удалить при ее обратной продувке.

В качестве *газов-носителей* в хроматографах используется азот, аргон, гелий, воздух, водород, углекислый газ. Первые два, обладая малой теплопроводностью, не используются при применении детекторов по теплопроводности из-за низкой чувствительности. Аргон и гелий дороги. Гелий благодаря высокой теплопроводности может работать с детектором по теплопроводности. Из-за большой скорости диффузии при его использовании необходимы значительные скорости газа, на малых скоростях разделение смеси может не произойти. Если в состав определяемых компонентов входит водород, то гелий ввиду близких к нему свойств нельзя использовать в качестве газа-носителя.

Воздух в силу его доступности обладает важным преимуществом перед другими газами, однако подобно азоту и аргону при работе с детекторами по теплопроводности не обеспечивает высокой чувствительности. Воздух удобно использовать при работе с тер-

Таблица 16.3. Порог чувствительности детекторов газовых хроматографов

Детектор	Порог чувствительности, г/мл	Анализируемое вещество
По теплопроводности	$2 \cdot 10^{-8}$ (по пропану)	Универсального назначения измеряет органические и неорганические вещества Горючие вещества Органические горючие вещества Органические вещества
Термохимический	$10^{-8}$ (по бутану)	
Пламенно-ионизационный	$5 \cdot 10^{-11}$ (по пропану)	
Ионизационный различных типов	$10^{-11}$ — $10^{-12}$ (по воздуху)	

мохимическими детекторами, для работы которых необходимо присутствие кислорода. Воздух нельзя применять, если в состав анализируемой смеси входят азот, кислород, аргон.

Водород благодаря высокой теплопроводности обеспечивает максимальную чувствительность при работе детектора по теплопроводности. Из-за малой вязкости можно использовать при работе с длинными колонками. Недостатком водорода являются взрывоопасность и восстановительные свойства, которые усложняют работу чувствительных элементов детекторов. Средние линейные скорости газа в насадочных колонках составляют 2—5 см/с, а в капиллярных 10—15 см/с. Расход газа-носителя при этом находится в пределах 0,1—2 см<sup>3</sup>/с. Давление газа-носителя на входе в колонку составляет  $(0,5 \div 1) \cdot 10^5$  Па, изменения давления в этих пределах не влияют на эффективность работы колонки, для которой существенным фактором является перепад на колонке.

Для обеспечения воспроизводимости показаний хроматографов необходима стабилизация скорости газа-носителя. Последняя осуществляется регуляторами расхода газа, устанавливаемыми на выходе баллона с газом-носителем. Расход газа контролируется ротаметрами.

**Дозаторы.** Для введения пробы газа в поток газа-носителя используются дозаторы, которые должны внести фиксированный объем пробы, не прерывая потока газа-носителя. Для каждой колонки, вида анализируемого газа, детектора существует оптимальный объем пробы, ограниченный снизу чувствительностью детектора, а сверху — перекрытием полос разделенных компонентов на хроматограмме. В среднем для различных типов хро-

матографов объем пробы составляет 0,1—20 см<sup>3</sup>. Ее ввод осуществляется шприцем или устройствами с дозирующими петлями постоянного объема, из которых проба вытесняется газом-носителем.

**Детектор,** являясь измерительной частью хроматографа, оказывает существенное влияние на результаты анализа. Поскольку чувствительность детектора является фактором, обуславливающим работу остальных элементов установки и определяющим возможности хроматографа, в табл. 16.3 для наиболее распространенных детекторов приведены порог чувствительности и анализируемые вещества.

К числу наиболее простых относятся детекторы по теплопроводности и термохимические, хотя по чувствительности они значительно уступают ионизационным. По принципу действия эти детекторы аналогичны рассмотренным в § 16.3 тепловым газоанализаторам. В связи с тем что в процессе работы хроматографа свойства газа-носителя могут изменяться, в детекторах указанного типа вводятся плечи сравнения, омываемые газом-носителем. Принципиальная схема газового детектора по теплопроводности (катарометра) приведена на рис. 16.12. Измерительная схема представляет собой неуравновешенный мост, в котором плечи из платиновой проволоки  $R_1$  и  $R_3$  омываются смесью газа-носителя с определяемым компонентом, выходящей из разделительной колонки, а плечи  $R_2$  и  $R_4$ , аналогичные  $R_1$  и  $R_3$ , омываются газом-носителем. Чувствительность катарометра существенно повышается при использовании в качестве газа-носителя водорода или гелия. Катарометры характеризуются стабильностью работы и применяются для анализа газового топлива, определения

в продуктах горения содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ .

Пламенно-ионизационные детекторы основаны на измерении сопротивления пламени водорода при введении в него компонентов анализируемой смеси. Пламя чистого водорода обладает большим сопротивлением, а его температура достигает  $800\text{--}900^\circ\text{C}$ . При введении органического вещества в поток пламени происходит ионизация молекул компонента и сопротивление пламени резко снижается.

Для измерения сигнала детектора используются электрометрические усилители с большим входным сопротивлением. Пламенно-ионизационный де-

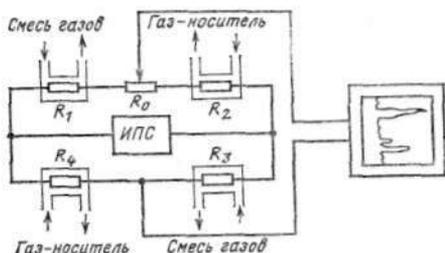


Рис. 16.12. Принципиальная схема детектора по теплопроводности (катарометра)

тектор входит в состав большинства отечественных и зарубежных хроматографов.

К группе ионизационных относятся аргонный и гелиевый детекторы, детектор по захвату электронов и др. Эти детекторы включают источник  $\beta$ -излучения, в качестве которого часто используется тритий. В аргонном детекторе смесь газов после разделительной колонки протекает через измерительную камеру, камера сравнения заполняется аргоном. При попадании в измерительную камеру анализируемого компонента происходит его ионизация, сопровождаемая резким снижением сопротивления и увеличением тока, протекающего через измерительную камеру. Это изменение тока, пропорциональное концентрации анализируемого компонента, измеряется электрометрическим усилителем.

При хроматографическом разделении связь между видом компонента, его концентрацией и определяющими параметрами: времени удерживания, площадью пика или его высотой — устанавливается при градуировке хроматографа. Для ее проведения исполь-

зуются три метода: абсолютный, внутренней нормализации и внутреннего стандарта.

При абсолютном методе градуировочный коэффициент или график (при нелинейной характеристике), связывающий площадь пика или его высоту с концентрацией, определяется введением известной концентрации чистых газов по всем анализируемым компонентам.

При градуировке по методу внутренней нормализации градуировочный коэффициент определяется для одного чистого вещества, для других коэффициенты рассчитываются по соотношению свойств газов, например теплопроводностей, используемых в детекторе.

В методе внутреннего стандарта введение в градуировочную смесь стандартного вещества используется для расчета учитывающих конкретные условия работы хроматографа поправок к паспортным градуировочным коэффициентам.

## 16.8. Лабораторные и промышленные хроматографы

Как отечественная, так и зарубежная промышленность выпускает хроматографы, предназначенные для лабораторного и промышленного использования. Первые, как правило, характеризуются повышенной точностью, универсальностью, большим числом элементов и повышенными требованиями к условиям эксплуатации.

Промышленные хроматографы обычно имеют более узкое назначение, а вырабатываемый ими сигнал представляется в форме, удобной для использования при оперативном и автоматическом управлении технологическими процессами.

Отечественная промышленность выпускает ряд лабораторных хроматографов: серии «Цвет-100», серии ЛХМ-8МД, «Газохром 1106», «Газохром 310», ЛХМ-724, ХГ-1Г, «Луч», «Вырхром», АК-5, АК-1. К группе промышленных хроматографов относятся хроматографы типов ХПА, ХТ, ХТД, РХ.

Хроматограф «Газохром 3101» относится к числу специализированных и предназначен для экспрессного определения концентрации  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и углеводородов до  $\text{C}_4$  включительно в продуктах горения различных видов топлив, сжигаемых в промышленных и станционных котельных, печах и других теплоиспользующих установках. Относительная погрешность измерения составляет  $\pm 5\%$ , продолжительность анализа достигает 10 мин. Прибор является переносным, его масса не превышает 8 кг.

Принципиальная схема хроматографа «Газохром 3101» представлена на рис. 16.13. Хроматограф является двухпоточным с газ-носителями воздухом и аргоном. Детектор 1 является комбинированным. Плечо  $R_2$  представляет собой термохимический элемент, ре-

тенциометр КСП-4 2, имеющий диапазон измерения 0—1 мВ.

Воздух в хроматограф подается микрокомпрессором 3, вмонтированным в прибор, аргон берется из баллона. Оба газа-носителя предварительно пропускаются через фильтры-осушители 4. Расход газа-носителя в обоих каналах контролируется реометром 5. Разделение анализируемой смеси производится при комнатной температуре. Хроматограф имеет четыре разделительные колонки, выполненные из фторопластовой трубки, имеющей внутренний диаметр 3 мм при длине 0,5—3 м. В качестве адсорбента в колонках 6, 8 используются активированный уголь, в колонке 7—молекулярные сита. Колонка, не показанная на рисунке, заполнена силикагелем. Ввод пробы дозатором осуществляется в точках 9—11.

Указанная на рис. 16.13 компоновка колонок используется для детектирования в смеси  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ . При этом через колонку 6 протекает воздух, а через 7, 8—

В вольтамперметрических газоанализаторах используется фоновый раствор электролита, в котором при соответствующем материале электродов и уровне действующего напряжения происходит поляризация одного из электродов, и ток в цепи при отсутствии определяемого газа практически равен нулю.

При наличии анализируемого газа в цепи возникает поляризационный ток, который определяется количеством введенных в фоновый раствор молекул газа, способных окисляться или восстанавливаться на поляризованном электроде, изменяя его потенциал. Сравнительный электрод имеет поверхность, в сотни раз превышающую поверхность измерительного электрода, благодаря чему его потенциал не зависит от протекающего в цепи тока.

При введении в раствор деполяризующего анализируемого газа на поверхности поляризованного электрода протекают следующие реакции: перенос деполяризатора из раствора на поверхность электрода, электрохимическая реакция на электроде, выделение на нем продуктов реакции. В большинстве случаев наиболее медленным процессом является перенос деполяризатора, при диффузионном подводе которого ток в растворе  $I$  определяется соотношением

$$I = nFSD \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0}, \quad (16.6)$$

где  $n$  — число переносимых электронов;  $F$  — число Фарадея;  $S$  — площадь электрода;  $D$  — коэффициент диффузии;  $\left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0}$  — пространственный градиент концентрации у поверхности электрода.

Согласно (16.6) ток в растворе возрастает с увеличением концентрации деполяризующего вещества и площади электрода. Снижение толщины диффузионного слоя вследствие перемешивания электролита также приводит к росту тока.

Увеличение действующего в цепи напряжения вызывает пропорциональное увеличение тока, но в ограниченных пределах, определяемых вовлечением в электродный процесс всех близлежащих деполяризующих частиц. Установившийся ток, называемый диффузионным, определяется скоростью диффузии частиц из глубины раствора.

График зависимости тока от приложенного напряжения называется поляризационной кривой. Ее характер при заданном типе электродов и фоновом электролите определяется видом газа, а диффузионный ток  $I_d$  — его концентрацией. График поляризационной кривой, представленный на рис. 16.15, имеет форму волны. Полуволновый потенциал, соответствующий половине диффузионного тока, не зависит от концентрации и является характеристикой деполяризатора. Таким образом, в вольтамперметрических газоанализаторах протекающий во внешней цепи ток, являющийся выходным сигналом

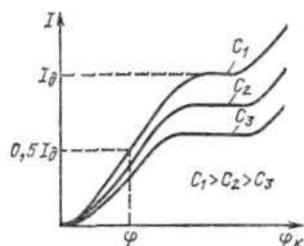


Рис. 16.15. Графики поляризационных кривых

анализатора, однозначно определяется концентрацией определяемого газа.

Если в качестве измерительного электрода используется ртуть, приборы называются полярографическими анализаторами или полярографами.

При измерениях концентрации кислорода в чистых газах в качестве поляризованного электрода используется катод, фоновым электролитом служит раствор кислоты. Подвод анализируемого газа осуществляется таким образом, чтобы между концентрациями кислорода в газах и электролите устанавливалось равновесие. Кислород, являясь активным деполяризатором, восстанавливается на катоде до перекиси водорода, вызывая прохождение поляризационного тока.

При анализе содержания  $SO_2$  в технических газах для исключения влияния кислорода в качестве поляризованного электрода используется анод, на котором  $SO_2$  окисляется с образованием серной кислоты.

**Кулонометрические газоанализаторы.** Кулонометрические газоанализаторы основаны на измерении количества электричества, израсходованного при электролизе. Согласно закону Фарадея для выделения при электролизе коли-

чества вещества  $G$  необходимо через раствор пропускать ток  $I$  в течение времени  $t$  [22]:

$$G = MI/(96492n),$$

где  $M$  — молекулярная масса окисленного или восстановленного вещества;  $n$  — число электронов, участвующих в электродном процессе.

Выделившееся при электролизе вещество связывается без остатка с анализируемым компонентом газовой смеси, благодаря чему мерой концентрации последнего служит протекающий ток  $I$ . Последний регулируется таким образом, чтобы обеспечивалась нейтрализация раствора.

Кулонометрические газоанализаторы благодаря использованию компенсационного метода измерения обеспечивают высокую точность измерения, их показания не зависят от влажности газа, его давления и температуры, параметров окружающей среды.

Отечественной промышленностью выпускаются кулонометрические газоанализаторы «Атмосфера 1» и «Атмосфера 2», предназначенные для измерения содержания в воздухе микроконцентраций  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $Cl_2$ ,  $O_3$ .

#### 16.10. Эксплуатация и поверка газоанализаторов

Качество и надежность работы промышленных газоанализаторов в значительной мере зависят от способа отбора пробы и соблюдения требований к характеристикам газа, поступающего в приемник газоанализатора. Эти требования относятся к температуре, давлению, расходу и влажности газа, наличию в нем механических, агрессивных и других примесей.

Отбираемая проба газа должна быть представительной, т. е. по своему составу соответствовать усредненному составу газов в соответствующих сечениях технологических объектов. В связи с этим отбор проб из трубопроводов должен производиться в сечениях с установившимся потоком, удаленных от местных сопротивлений. Не рекомендуется производить отбор из нижних точек трубопровода, в которых могут собираться механические примеси и влага. Если газы содержат частицы золы, угольную и другую пыль, то для отбора пробы используются керамические фильтры, вводимые в из-

меряемую среду. Вблизи точек отбора не должно быть ввода технологических потоков, создающих пространственный градиент концентраций, а также устройств, через которые возможен подсос воздуха или других газов. Так, при анализе топочных газов на содержание  $O_2$ , характеризующего избыток подаваемого в топку воздуха, отбор пробы производится из трубы, шунтирующей конвективные поверхности нагрева. Газы в трубу поступают после пароперегревателя, а возвращаются в газоход после воздухоподогревателя. При этом подсосы воздуха, имеющие место в конвективных поверхностях нагрева, не влияют на состав анализируемого газа.

Для подготовки пробы газа и ее транспортировки через газоанализатор используются вспомогательные устройства, которые, исходя из их функций, разделяются на газоотборные, редуцирующие, охлаждающие, очистные, просасывающие и др. Набор этих устройств, входящих в состав газоанализатора, зависит от типа последнего, состава и параметров анализируемого газа. В качестве примера на рис. 16.16 представлена схема установки приемника кислородомера. Наиболее распространенным устройством, используемым для отбора пробы, является керамический фильтр 1. Он вводится в поток газа, имеющего температуру до  $500^\circ C$ , содержание пыли до  $20 \text{ г/м}^3$ , и может обеспечить расход газа через установку до  $0,8 \text{ л/мин}$ . При использовании водяного охлаждения фильтра температура газов в точке отбора может достигать  $1700^\circ C$ . Нижняя граница температур газов в точках отбора определяется возможностью образования при конденсации жидких частиц, забивающих поры фильтра. Для защиты от механического истирания частицами золы керамический фильтр 1 закрывается стальным щитком.

Наклон газоотводящей трубки обеспечивает отток конденсата, а наличие на ее конце пробки — возможность периодической продувки фильтра, которая производится сжатым воздухом при закрытом кране.

При повышенных температурах газов газоанализатор снабжается холодильником 2, который обеспечивает также снижение влажности анализируемого газа. Конструкция холодильника зависит от температуры и состава

ва газа. При температуре газов 400—600°C используются прямоканальные холодильники, в которых охлаждающая вода снаружи омывает трубку, по которой протекает газ. В змеевиковых холодильниках трубка свернута спиралью. В нижней части холодильника имеется полость для сбора конденсата 3, сливающегося в дренаж с использованием гидрозатвора. В холодильнике 2, изображенном на рис. 16.16, используется комбинированный охладитель, нижняя его часть, заполненная железными стружками, служит для сбора конденсата и удаления сернистого газа.

Установки газоанализаторов обычно содержат несколько фильтров, пред-

Для поглощения сероводорода фильтр заполняется болотной рудой, двуокись углерода удаляется поглотителем ХПИ, а хлор — активированным углем. Водород сжигается в электрических печах дожигания.

На рис. 16.16 элементы 5—9 предназначены для прососа газа через установку, контроля и поддержания постоянства его расхода и давления. Ротаметром 6 измеряется расход газа, регулируемый вентилем 5. Требуемое разрежение в линии устанавливается вентилем 7 и контролируется жидкостным дифманометром 8 или мембранным тягомером. Водоструйный эжектор 9 служит побудителем расхода, в качестве последнего могут использо-

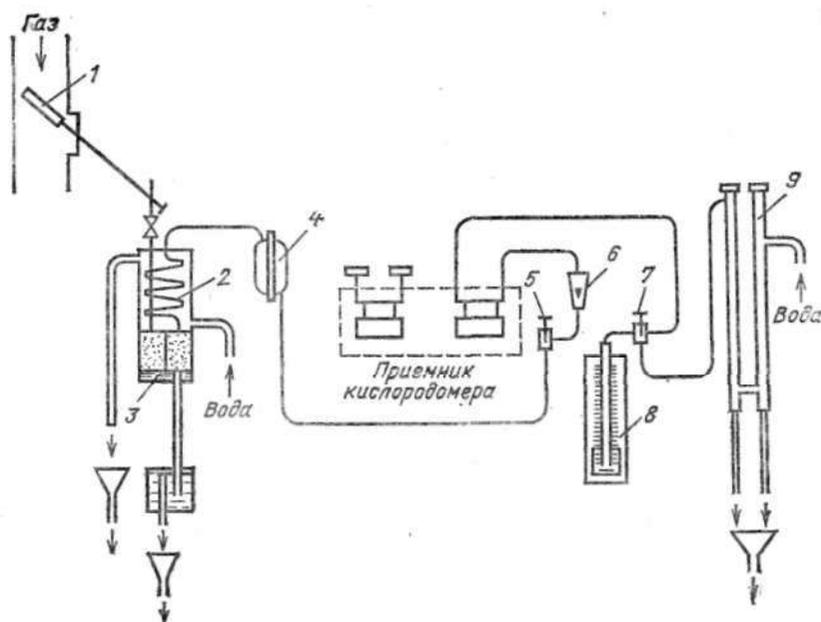


Рис. 16.16. Схема установки приемника кислородомера МН

назначенных для очистки газа от механических частиц, капелек влаги и неопределяемых компонентов. Так, установка, представленная на рис. 16.16, помимо керамического фильтра 1 для удаления мелких механических частиц включает в себя тканевый фильтр тонкой очистки 4, который благодаря прозрачной крышке служит также в качестве контрольного.

Для осушки газа используются фильтры, заполненные гранулами хлористого кальция, или силикагели. Удаление неопределяемых компонентов производится химическими фильтрами или с помощью печей дожигания.

Также используются центробежные, пластинчатые и другие электронасосы.

Перечисленные вспомогательные элементы типизированы и входят в состав блоков регулировки и фильтрации типа Б, модификации которых различаются набором фильтров. Расход газа через блок регулировки и фильтрации достигает 8 л/мин.

Для газоанализаторов, работающих в системах автоматического регулирования, важной характеристикой является запаздывание показаний. Для того чтобы у газоанализатора показания новой концентрации установились в пределах основной погрешности, необ-

ходима в среднем двух—пятикратная смена внутреннего объема в установке от точки отбора давления до приемника. В связи с этим последние вместе с вспомогательными устройствами размещают вблизи технологических объектов. Для уменьшения запаздывания показаний используется повышение скорости анализируемого газа в линиях за счет байпасирования приемника газоанализатора. Сокращение дли-

ны газовых линий и уменьшение запаздывания может быть получено также за счет отбора газа из петель, шунтирующих участки технологических объектов.

Проверка показаний газоанализаторов производится с помощью образцовых газовых смесей, заключенных в баллоны и прилагаемых к газоанализаторам.

## Глава семнадцатая

### АНАЛИЗ СОСТАВА ЖИДКОСТЕЙ

#### 17.1. Методы анализа состава жидкостей

Ведение технологических процессов в химической, газо- и нефтехимической промышленности, энергетике во многих случаях основывается на результатах анализа состава жидкостей. Одним из важных моментов работы по охране окружающей среды является контроль за состоянием естественных и искусственных водоемов и анализ сбросных вод промышленных предприятий и населенных пунктов, которые осуществляются также с использованием анализаторов состава жидкостей. К числу наиболее распространенных методов анализа жидкостей, применяемых в промышленных анализаторах, относятся разновидности электрохими-

ческого, оптического и теплового методов, приведенные в табл. 17.1.

В табл. 17.1 не приведены такие методы, как хроматографический, титрометрический, масс-спектрометрический. Первый более широко применяется для анализа состава газов, в связи с чем изложен в гл. 16. Титрометрический и масс-спектрометрический методы в основном используются в лабораторной практике и в данной главе не рассматриваются.

Из перечисленных в табл. 17.1 методов наибольшей разрешающей способностью обладают пламенно-ионизационный, колориметрический, вольтамперметрический и кулонометрический, применяемые для измерения микроконцентраций растворенных веществ. Последние два метода были рассмот-

Т а б л и ц а 17.1. Методы анализа растворов

Метод	Измеряемая величина
<i>Электрохимический</i>	
Кондуктометрический	Общая электропроводность, концентрация диссоциирующего вещества в растворе, кондуктометрическое титрование Концентрация ионов (ионометрия), окислительно-восстановительный потенциал (редоксометрия), потенциометрическое титрование Концентрация определенного вещества в расплаве или растворе
Потенциометрический	
Вольтамперметрический	
Кулонометрический	
<i>Оптический</i>	
Колориметрический	Измерение концентрации ионов и вещества в расплаве или растворе
Пламенно-фотометрический	
Турбидиметрический	Измерение концентрации взвешенных частиц в суспензиях и эмульсиях
Нефелометрический	
<i>Тепловой</i>	
Термокондуктометрический	Измерение концентрации растворенных газов

рены в § 16.9. Подобно газоанализаторам приборы для анализа жидкостей представляют собой установки, содержащие помимо первичных и измерительных преобразователей вспомогательные устройства для подготовки пробы и ее транспортирования.

### 17.2. Кондуктометрический<sup>1</sup> метод анализа растворов. Общие сведения

Водные растворы электролитов представляют собой проводники второго рода, перенос тока в которых осуществляется движением ионов. Последние образуются при диссоциации веществ, находящихся в растворе. Электропроводность характеризует суммарную концентрацию находящихся в растворе ионов, в связи с чем приборы для ее измерения градуируются в единицах удельной электропроводности: См/см (сименс на сантиметр) и мкСм/см, в единицах условного содержания (мг/кг NaCl) или концентрации (% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Удельная электропроводность раствора  $\kappa$ , См/см, являющаяся величиной, обратной удельному сопротивлению, связана с эквивалентной концентрацией  $\eta$  (г-экв/см<sup>3</sup>) следующей зависимостью [23]:

$$\kappa = \sigma \eta \lambda, \quad (17.1)$$

где  $\sigma$  — степень диссоциации молекул растворенного вещества;  $\lambda$  — эквивалентная электропроводность вещества при бесконечном разбавлении.

Степень диссоциации определяется числом молекул, диссоциированных на ионы. При одной и той же концентрации молекулы сильных электролитов диссоциируют больше, чем слабые. К сильным относятся соляная, серная, азотная кислоты, большинство солей, щелочи, к слабым электролитам — органические кислоты. По мере снижения концентрации степень диссоциации растет, приближаясь к единице.

При полной диссоциации молекул эквивалентная электропроводность раствора определяется подвижностью анионов  $\lambda_a$  и катионов  $\lambda_k$ , зависящей от природы диссоциированного вещества и свойств растворителя:

$$\lambda = \lambda_a + \lambda_k.$$

Поскольку в (17.1)  $\sigma$  меняется с изменением концентрации, зависимость

удельной электропроводности от концентрации носит сложный характер. Графики этих зависимостей для ряда веществ представлены на рис. 17.1. Как видно из графиков, близкий к линейному рост электропроводности с увеличением концентрации наблюдается при значениях последней, составляющих 5—10%. Рост концентрации свыше 15—30% сопровождается снижением электропроводности вследствие уменьшения степени диссоциации молекул. Учитывая неоднозначный характер зависимости электропроводности от концентрации, необходимо зара-

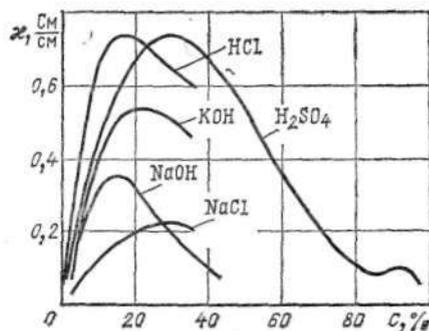


Рис. 17.1. Графики зависимости удельной электропроводности от концентрации при 18°C

нее знать область работы кондуктометра, исключая возможность измерений в области экстремума.

Удельная электропроводность раствора зависит не только от концентрации вещества и его природы, но и от температуры. Уравнение Кольрауша устанавливает связь между удельной электропроводностью раствора и температурой:

$$\kappa_t = \kappa_{25} [1 + \alpha(t - 25) + \beta(t - 25)^2]. \quad (17.2)$$

При изменении температуры в пределах 15—35°C квадратичный член в уравнении (17.2) может быть опущен. В табл. 17.2 приведены значения подвижностей ионов при температуре 25°C и температурный коэффициент  $\alpha$ , характеризующий увеличение подвижности ионов с ростом температуры.

Согласно данным, приведенным в табл. 17.2, подвижность ионов водорода и гидроксильной группы при бесконечном разбавлении в 2—8 раз выше, чем подвижность остальных ионов. Этим объясняется высокая электропроводность кислот и щелочей. Приведен-

<sup>1</sup> От слова conduct (англ.) — проводить.

Таблица 17.2. Значения подвижностей ионов и температурного коэффициента

Катионы	$\lambda_{\text{к}}$ , См·см <sup>2</sup> /г-эква	$\alpha$ , 1/°C	Анионы	$\lambda_{\text{а}}$ , См·см <sup>2</sup> /г-эква	$\alpha$ , 1/°C
H <sup>+</sup>	349,8	0,0142	ОН <sup>-</sup>	198,3	0,0196
Na <sup>+</sup>	50,10	0,0208	Cl <sup>-</sup>	76,35	0,0193
K <sup>+</sup>	73,50	0,0187	F <sup>-</sup>	55,4	0,021
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	73,55	0,0187	Br <sup>-</sup>	78,14	0,0185
Li <sup>+</sup>	38,6	0,0214	I <sup>-</sup>	76,85	0,019
Ag <sup>+</sup>	61,90	0,0194	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	44,5	0,0202
1/2 Ca <sup>2+</sup>	59,50	0,021	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	71,4	0,0248
1/2 Mg <sup>2+</sup>	53,05	0,0218	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71,4	0,0184
1/2 Fe <sup>2+</sup>	53,5	0,024	1/2 CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	69,3	0,0192
1/2 Zn <sup>2+</sup>	54,0	0,0185	1/2 NO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80,02	0,0206

ные в табл. 17.2 данные показывают, что изменение температуры на один градус вызывает изменение подвижности на 1,5—2,5 %. Это обуславливает необходимость стабилизации температуры раствора и введение температурной компенсации.

Если в сильно разбавленном растворе содержится ряд ионов с эквивалентной концентрацией каждого  $\eta_i$ , то результирующая электропроводность определяется суммарной электропроводностью всех ионов

$$\kappa = \sum_{i=1}^n \lambda_i \eta_i.$$

Степень диссоциации слабых электролитов зависит от присутствия в растворе сильных электролитов. В связи с этим на их удельную электропроводность влияет не только концентрация вещества, но и состав раствора.

К приборам, предназначенным для измерения электропроводности, относятся кондуктомеры, солемеры, концентратомеры. Первые градуируются в единицах электропроводности, вторые — в единицах условного содержания, обычно в процентах содержания NaCl. Концентратомеры градуируются в процентах содержания анализируемого вещества.

Следует отметить, что теоретически чистая вода при температуре 25 °C обладает электропроводностью, составляющей 0,055 мкСм/см. При измерении малых концентраций растворенных веществ электропроводность воды созда-

ет фоновую составляющую, нарушающую пропорциональную зависимость между электропроводностью и концентрацией.

На тепловых и атомных электростанциях конденсат перегретого и насыщенного пара, питательная и химически обессоленная вода, обладающая малым содержанием, содержат растворенные газы CO<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub>, которые образуют ионы H<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. В результате электропроводность воды, обусловленная концентрацией нелетучих компонентов, составляет проценты общей электропроводности. Для снижения влияния на электропроводность растворенных газов используются предвключенные Н-катионитовые фильтры, производится дегазация пробы и ее концентрирование путем упаривания.

При пропускании маломинерализованных вод, содержащих растворенный аммиак и углекислый газ, через Н-катионитовый фильтр аммиак задерживается, а нелетучие примеси переходят в соответствующие кислоты. При этом электропроводность, обусловленная нелетучими примесями, за счет большой подвижности ионов водорода возрастает в 3—4 раза, влияние растворенных газов снижается, поскольку в присутствии сильных кислот также уменьшается диссоциация молекул H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Для измерения концентрации растворов по их электропроводности используются электродные и безэлект-

родные методы, последние менее распространены и применяются в основном для измерения концентраций кислот, щелочей.

### 17.3. Электродные кондуктометры

В общем случае первичные преобразователи электродных кондуктометров представляют собой две погруженные в жидкость пластины (электроды), сопротивление раствора  $R_x$  между которыми связано с удельной электропроводностью следующей зависимостью:

$$R_x = l/(kS) = k/k, \quad (17.3)$$

где  $l$ ,  $S$  — расстояние между электродами и их площадь.

Коэффициент  $k$ , имеющий размерность  $\text{см}^{-1}$ , называют постоянной первичного преобразователя (датчика). При известной постоянной первичного преобразователя легко осуществляется переход от измеряемого обычными методами сопротивления  $R_x$  к удельной электропроводности раствора. Постоянная преобразователя определяется путем градуировки по образцовым растворам с известной электропроводностью.

Измерительные мосты, используемые для измерения сопротивления первичного преобразователя электропроводности, питаются переменным током. При использовании постоянного тока происходит поляризация электродов. У их поверхности собираются ионы противоположного знака и продукты электролиза (пузырьки газов), вызывая образование внутренней противо-ЭДС и увеличение сопротивления раствора. Электродные эффекты при прочих равных условиях зависят от материала электродов и состояния их поверхности. Платиновые электроды обладают минимальным поляризационным сопротивлением, и их применяют в лабораторных кондуктометрах при выполнении измерений повышенной точности. Электроды промышленных кондуктометров выполняются из нержавеющей стали.

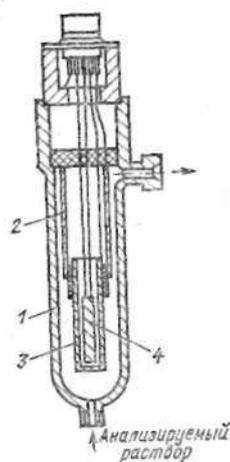
При питании первичных преобразователей переменным током влияние поляризации электродов на результат измерения снижается по мере роста частоты. Преобразователи промышленных кондуктометров питаются переменным током частотой 50 Гц, на лабораторные кондуктометры, включаю-

щие мосты полных проводимостей, подается переменное напряжение частотой 1—2 кГц и выше от звуковых генераторов.

При питании электродных преобразователей переменным током между электродами помимо активного сопротивления возникает и емкостное, зависящее от диэлектрической проницаемости раствора. Комплексный характер сопротивления преобразователя должен быть учтен при измерении путем введения комплексного сопротивления в одно из прилежащих к  $R_x$  плеч моста, используемого для измерения сопротивления раствора.

Электродные преобразователи для измерения электропроводности в промышленных условиях разделяются на магистральные, погружные и проточные. Магистральные преобразователи

Рис. 17.2. Схема проточного электродного преобразователя кондуктометра КК-1



вводятся непосредственно в трубопровод, по которому течет анализируемый раствор. Погружные преобразователи опускаются в резервуар с контролируемой жидкостью. Через проточный преобразователь протекает проба анализируемого раствора, прошедшая в большинстве случаев предварительную подготовку. Внутри преобразователя, как правило, находится терморезистор, с помощью которого осуществляется компенсация влияния температуры.

Схема проточного преобразователя кондуктометра КК-1 представлена на рис. 17.2. Корпус 1 служит одним электродом, второй — внутренний — состоит из двух изолированных между собой цилиндров 2, 3 различного диаметра и высоты. При подключении электрода 2 постоянная преобразова-

да  $\beta = 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Внутри электрода  $\beta$  находится терморезистор 4.

Для снижения влияния поляризации используются четырехэлектродные преобразователи (рис. 17.3). К внешним электродам 1, 4 подводится напряжение питания, внутренние электроды 2, 3 являются измерительными. При поддержании постоянства протекающего через первичный преобразователь тока разность потенциалов между электродами 2, 3 будет зависеть от электропроводности и постоянной преобразователя. Терморезистор 5 намотан на электрод 2, электроды разделены между собой и корпусом 8 втулками 6 с прокладками 7.

Рассмотренные выше первичные преобразователи кондуктометров могут включаться в различные измерительные схемы. К числу наиболее распространенных относится схема уравновешенного моста, представленная на

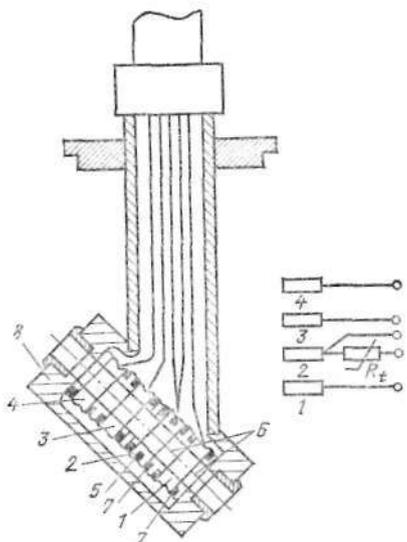


Рис. 17.3. Схема погружного электродного преобразователя кондуктометра КК-2,3

рис. 17.4. Последняя включает в себя помимо реохорда  $R$  три постоянных резистора  $R_1—R_3$ . Конденсатор  $C$  служит для компенсации емкостной составляющей сопротивления электродного преобразователя, который на схеме входит в плечо, включающее медный проволочный резистор  $R_1$  и шунтирующий манганиновый резистор  $R_{ш}$ .

Последний служит для согласования температурных коэффициентов цепи, включающей в себя  $R_x$ ,  $R_{ш}$  и медный резистор. Мост питается напряжением промышленной частоты. Сигнал небаланса моста поступает на усилитель  $У$ , выходной сигнал которого приводит во вращение вал реверсивного двига-

тора и показывающей стрелки прибора.

В рассматриваемой измерительной схеме компенсация влияния температуры раствора на электропроводность осуществляется с помощью медного резистора  $R_1$ , размещенного внутри первичного преобразователя и имеющего температуру раствора. Поскольку сопротивление раствора  $R_x$  имеет отрицательный температурный коэффициент, а медный резистор — положительный, включение последнего в противоположное или одно плечо с первичным преобразователем позволяет снизить влияние температуры.

Для осуществления температурной компенсации могут быть также

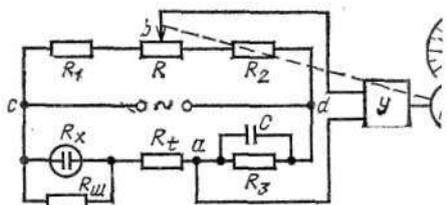


Рис. 17.4. Измерительная схема кондуктометра

пользованы полупроводниковые резисторы и жидкостные преобразователи сравнения. Последние имеют ту же конструкцию, что и рабочие преобразователи, но их герметизированный корпус заполнен раствором с постоянной концентрацией. Преобразователи сравнения погружаются в анализируемый раствор и имеют его температуру. Поскольку сопротивление полупроводниковых резисторов и жидкостных преобразователей сравнения, как и рабочих, имеют отрицательный температурный коэффициент, они включаются в одно из плечей моста.

Кондуктометр АК-310, который имеет диапазон измерения  $0—1$ ;  $0—10$  и  $0—100$  мк и выходной токковый сигнал  $0—5$  мА при погрешности  $\pm 5\%$ , включает помимо первичного преобразователя  $П$  измерительный ИР и нормирующий ИР, последний служит для получения унифицированного сигнала. Схема кондуктометра с включенными катионитовыми фильтрами представлена на рис. 17.5 [24]. В первом преобразователе, содержащем помимо измерительных электродов с сопротивлением  $R_x$  проводниковый терморезистор  $R_1$ , анализируемая вода поступает после предвключения Н-катионитовых фильтров 1, ее расход регулируется ротаметром 2. Измеритель-

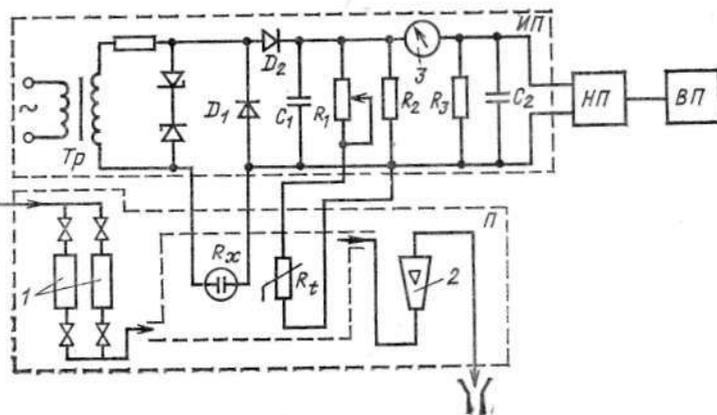
Схема преобразователя ИП содержит последовательно соединенные питающую вторичную обмотку трансформатора  $Tp$ , первичный преобразователь  $R_x$  и цепь температурной компенсации. Последняя включает в себя резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  с параллельной цепью нагрузки, содержащей показывающий узкопрофильный микроамперметр  $З$  и резистор  $R_3$ . С последнего сопротивления снимается сигнал до 10 мВ, подаваемый на нормирующий преобразователь ИП. Выходной токовый сигнал 0—5 мА поступает на вторичный автоматический миллиамперметр КСУ. В измерительном преобразователе через нагрузочное сопротивление  $R_2$  протекает однополупериодный ток, сглаживаемый конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$ . При увеличении концентрации сопротивление  $R_x$  снижается, при этом возрастает ток и падение

напряжения на резисторе  $R_2$ . Последнее вызывает увеличение показаний микроамперметра  $З$  и рост выходного сигнала ИП. При увеличении температуры раствора  $R_x$  также снижается, но при этом снижается и сопротивление полупроводникового резистора  $R_1$ , включенного параллельно  $R_2$ . Относительное уменьшение сопротивления  $R_1$  с помощью резистора  $R_1$  устанавливается таким, чтобы падение напряжения на параллельных резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  оставалось неизменным при увеличении тока, вызванного ростом температуры раствора.

#### 17.4. Безэлектродные кондуктометры

Безэлектродные преобразователи, как говорит их название, содержат первичные преобразователи, не имеющие непосредственного контакта с измеряемой средой и свободные в связи с этим от таких недостатков, как поляризация электродов и их загрязнение.

Рис. 17.5. Принципиальная измерительная схема кондуктометра АК-310



напряжения на резисторе  $R_2$ . Последнее вызывает увеличение показаний микроамперметра  $З$  и рост выходного сигнала ИП. При увеличении температуры раствора  $R_x$  также снижается, но при этом снижается и сопротивление полупроводникового резистора  $R_1$ , включенного параллельно  $R_2$ . Относительное уменьшение сопротивления  $R_1$  с помощью резистора  $R_1$  устанавливается таким, чтобы падение напряжения на параллельных резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  оставалось неизменным при увеличении тока, вызванного ростом температуры раствора.

К числу распространенных анализаторов жидкости относятся кондуктометры серии КК, которые содержат как двух- и четырехэлектродные преобразователи, так и безэлектродные. Приборами этой серии можно производить измерения электропроводности от  $10^{-6}$  до 1 См/см при диапазоне рабочих температур  $25 \pm 15^\circ\text{C}$  и предельной основной погрешности  $\pm 2,5\%$ .

К числу наиболее существенных недостатков электродных кондуктометров относятся рассмотренная выше поляризация и загрязнение электродов продуктами электрохимических реакций, протекающих на их поверхности, а также веществами, находящимися в растворах. Последнее вызывает необ-

ходимость их периодической механической или химической очистки и отмывки.

Различают две разновидности безэлектродных кондуктометров: высокочастотные и низкочастотные. В первых, работающих на частотах более 1 кГц, измерение концентрации анализируемого раствора производится путем контроля зависящего от нее реактивного сопротивления раствора.

Первичные преобразователи высокочастотных безэлектродных кондуктометров в зависимости от вида измеряемого реактивного сопротивления разделяются на емкостные и индуктивные. Схема преобразователей обоих видов представлена на рис. 17.6. Поскольку между концентрацией раствора и выходными величинами преобразователей  $C_x$  и  $L_x$  существует сложная зависимость, на которую влияют помимо природы раствора геометрия и материал преобразователя, частота питания и др., их градуировочные характеристики определяются экспериментально для конкретного преобразователя и раствора.

В качестве измерительных преобразователей высокочастотных кондуктометров используются мостовые и резонансные схемы, питаемые от гене-

Таблица 17.3. Контрольные растворы

Диапазон электрических проводимостей, См/см	Раствор	Номер раствора	Предельные концентрации, г/л
$10^{-1}$ —1	Водный серной кислоты	1; 2; 3	52—376
$10^{-4}$ — $10^{-1}$	Водный хлористого калия	4—12	0,14—15
$10^{-6}$ — $10^{-4}$	Хлористого калия в этиленгликоле	13—18	0,075—0,149

раторов высокой частоты. В последних схемах измеряется частота собственных колебаний резонансного контура, зависящая от индуктивного или емкостного сопротивления первичного преобразователя.

В низкочастотных безэлектродных кондуктометрах анализируемый раствор протекает по трубе, образующей замкнутый виток. Последний подобен

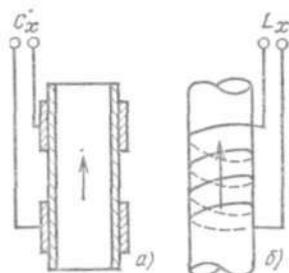


Рис. 17.6. Первичные преобразователи безэлектродных кондуктометров:

а — емкостные; б — индуктивные

проводнику, в котором от первичной обмотки трансформатора наводится ЭДС, а протекающий ток зависит от электропроводности раствора. Низкочастотные кондуктометры используют для измерения значительных электропроводностей растворов.

В кондуктометрах серии КК измерение электропроводности от  $10^{-2}$  до 1 См/см осуществляется безэлектродными кондуктометрами КК-8, КК-9, включающими в себя первичные преобразователи погружного и проточного типов. Схема такого кондуктометра представлена на рис. 17.7. Первичный преобразователь представляет собой кольцевую пластмассовую трубу 1, по которой протекает анализируемый раствор. Эта труба с электропроводящей жидкостью представляет собой вторичный виток трансформатора  $Tr_1$ , в котором наводится электродвижущая сила. Протекающий по контуру ток  $I_{ж}$  зависит от электропроводности раствора:

$$I_{ж} = E/R_x = E_k/k, \quad (17.4)$$

где  $k$  — постоянная преобразователя, см $^{-1}$ .

Для измерительного трансформатора  $Tr_2$  виток 1 является первичным и создает в сердечнике  $Tr_2$  магнитный поток  $\Phi_{ж}$ , пропорцио-

нальный току, протекающему в витке. Таким образом, в этом первичном преобразователе, как и в высокочастотных, отсутствуют электроды, контактирующие с анализируемой средой.

В кондуктометре используется компенсационный метод измерения. Магнитный поток  $\Phi_{ж}$ , создаваемый жидкостным витком 1, компенсируется потоком  $\Phi_{к}$ , создаваемым обмоткой  $w_2$  трансформатора  $Tr_2$ . Ток в этой обмотке изменяется при перемещении движка реохорда  $R$ , изменяющего напряжение, подаваемое в цепь компенсации. Обмотка  $w_2$  и

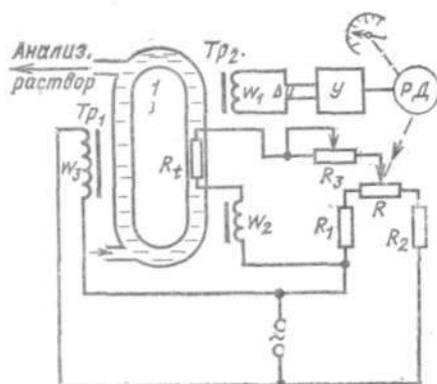


Рис. 17.7. Схема безэлектродного низкочастотного кондуктометра

обмотка возбуждения  $w_3$  имеют общее питание, что снижает влияние колебаний напряжения питания на показания прибора. Ток в обмотке  $w_2$  зависит не только от положения движка реохорда  $R$ , но и от сопротивления полупроводникового терморезистора  $R_t$ , осуществляющего температурную компенсацию. Результирующий магнитный поток в магнитопроводе трансформатора  $Tr_2$ , равный разности магнитных потоков, создаваемых жидким контуром и компенсационной обмоткой  $w_2$ , наводит в измерительной обмотке  $w_1$  ЭДС, которая подается на вход усилителя. Равновесие измерительной схемы, которому соответствует  $\Delta U = 0$ , имеет место при компенсации магнитных потоков, которое сохраняется при изменении температуры раствора.

**Проверка кондуктометров.** При выпуске, ремонте и эксплуатации кондуктометров необходимо производить проверку правильности их показаний. Может производиться проверка измерительного преобразователя без электродного первичного преобразователя с помощью образцового магазина сопротивлений. Проверка показаний всего комплекта выполняется либо по методу непосредственного сличения показаний поверяемого кондуктометра с об-

разцовым при измерении электропроводности контрольных растворов, либо по методу прямого измерения поверяемым кондуктометром удельной электропроводности стандартных растворов, имеющих электропроводность вблизи 20, 50, 80 % диапазона измерения. Контрольные растворы удельной электрической проводимости готовят весовым методом или разбавлением. Для их приготовления используют вещества и растворители, указанные в табл. 17.3.

### 17.5. Потенциометрический метод анализа. Теоретические основы

В практике анализа растворов значительное место занимают потенциометрические анализаторы, предназначенные для избирательного измерения активной концентрации определяемых ионов, в связи с чем их называют иономерами. Потенциометрический метод измерения базируется на законе Нернста, который был открыт для металлических электродов, а позднее распространен на электроды других веществ. Сущность рассматриваемого явления состоит в том, что при погружении металлического электрода в раствор на его поверхности возникает потенциал, зависящий от активной концентрации ионов этого металла в растворе. Возникновение потенциала обусловлено переходом ионов металла в раствор. В состоянии равновесия поверхностный потенциал обеспечивает выравнивание скоростей анодного и катодного процессов, связанных с переходом ионов металла в раствор и из раствора в электрод. Измерение поверхностного потенциала электрода позволяет судить о концентрации соответствующих ионов в растворе.

Уравнение Нернста, устанавливающее связь между равновесным потенциалом  $E$  на поверхности электрода и активной концентрацией соответствующих ионов в растворе  $a$ , имеет следующий вид [25]:

$$E = E_0 + RT(\ln a)/nF, \quad (17.5)$$

где  $E_0$  — нормальный потенциал;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $n$  — заряд ионов;  $F$  — число Фарадея.

Для измерения равновесного поверхностного потенциала  $E$  необходимо замкнуть электрическую цепь, вводя в раствор второй электрод, называемый вспомогательным или электродом сравнения. Потенциал этого электрода в процессе измерения должен оставаться постоянным. Для характеристики потенциалообразующих свойств различных веществ значения равновесных потенциалов определяются по отношению к вспомогательному платиновому водородному электроду, принятому в качестве нормального. Этот электрод представляет собой платиновую пластину, погруженную в раствор с активной концентрацией ионов водорода, равной единице, при давлении водородного газа 0,1 МПа и температуре 298 К. Равновесные потенциалы электродов  $E_0$ , определенные при их погружении в соответствующие однонормальные растворы по отношению к нормальному водородному электроду, являются измеренными по так называемой водородной шкале и считаются нормальными. Нормальные потенциалы для некоторых видов веществ приведены в табл. 17.4.

В табл. 17.4 знак минус стоит у потенциалов веществ, которые в ряду активностей стоят за водородом. В графе «электрод» указаны потенциалообразующие ионы и за чертой — материал рабочего электрода.

В настоящее время область применения потенциометрических методов измерения расширяется благодаря созданию ионоселективных электродов, обладающих специфическими функциями по отношению к таким катионам и анионам, как  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$  и др. Этот метод используется также для измерения окисли-

Таблица 17.4. Нормальные электродные потенциалы, определенные по водородной шкале

Электрод	Потенциал, В	Электрод	Потенциал, В
$\text{Li}^+/\text{Li}$	-3,045	$\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$	+0,337
$\text{K}^+/\text{K}$	-2,925	$\text{Ag}^+/\text{Ag}$	+0,799
$\text{Ca}^{2+}/\text{Ca}$	-2,866	$\text{Hg}^{2+}/\text{Hg}$	+0,845
$\text{Na}^+/\text{Na}$	-2,714	$\text{Pt}^{2+}/\text{Pt}$	+0,91
$\text{Al}^{3+}/\text{Al}$	-1,662	$\text{Cl}^-/\text{Cl}_2, \text{Pt}$	+1,3595
$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}$	-0,4402	$\text{Au}^{3+}/\text{Au}$	+1,498

тельно-восстановительного потенциала, характеризующего отношение активностей окисленной и восстановленной форм ионов в растворе. Вспомогательный электрод в этом случае является нейтральным, а на рабочем электроде развивается потенциал, при котором устанавливается динамическое равновесие между скоростями перехода электронов от восстановленной формы ионов к электроду и от электрода к окисленной форме ионов:

$$E = E_0 + 0,058 \lg(a_{Ox}/a_{Red})/n, \quad (17.6)$$

где  $a_{Ox}$ ,  $a_{Red}$  — активности соответственно окисленной и восстановленной форм ионов;  $n$  — число электронов, участвующих в реакции;  $E_0$  — нормальный окислительно-восстановительный потенциал системы при  $a_{Ox}/a_{Red} = 1$ .

Приборы, предназначенные для измерения окислительно-восстановительного потенциала, называются редоксметрическими анализаторами.

Активная концентрация ионов в растворах обычно выражается в единицах десятичного логарифма. Так,  $pH = -\lg a_{H^+}$ ,  $pNa = -\lg a_{Na^+}$  в связи с этим измерительные приборы получили соответственно название pH-метров, pNa-метров и т. д. Наиболее широко потенциометрические приборы применяются для измерения активной концентрации ионов водорода. Их использование осуществляется в двух направлениях, связанных с измерением щелочных или кислотных функций раствора и определением момента нейтрализации растворов при их титровании.

Чистая вода представляет собой нейтральное вещество, слабо диссоциирующее с образованием ионов водорода  $H^+$  и гидроксила  $OH^-$ . При температуре  $22^\circ C$  константа диссоциации воды определяется выражением  $K_{H_2O} = a_{H^+} \cdot a_{OH^-} = 10^{-14}$ , откуда  $a_{H^+} = a_{OH^-} = 10^{-7}$ ,  $pH = 7$ .

При растворении в воде кислот повышается концентрация ионов водорода, а pH снижается. При растворении щелочи концентрация ионов водорода снижается, а pH растет. Таким образом, отклонение числа pH в водных растворах от 7 в ту или другую сторону характеризует меру их кислотных или щелочных свойств. Следует отметить, что при повышении температуры чистой воды до  $100^\circ C$  она приобрета-

ет кислые свойства, при этом число pH снижается до 6,12. При нулевой температуре вода обладает щелочными свойствами и  $pH = 7,97$ . Для водных растворов диапазон изменения pH составляет 0—14, для такого растворителя, как аммиак, он достигает 0—32,7, а для муравьиной кислоты составляет 0—6,13.

### 17.6. Рабочие и вспомогательные электроды потенциометрических анализаторов

Для получения поверхностного скачка потенциала, зависящего от активной концентрации соответствующих ионов в растворе, могут использоваться электроды трех типов. Электроды первого типа представляют собой либо металлы, либо металлы с сорбированным на поверхности газом, как, например, водородный электрод. Элек-

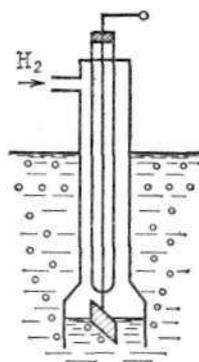


Рис. 17.8. Схема водородного электрода

троды второго типа являются системами, включающими в себя металлический контактный электрод, его плохо растворимую соль и раствор, содержащий анионы этой соли. Активная концентрация последних определяет величину электродного потенциала. К третьему типу относятся электроды специального назначения, имеющие более сложное устройство, такие, например, как электроды с жидкостными мембранами. Следует отметить, что электроды из чистых металлов в растворах быстро покрываются слоем окисной пленки и других химических соединений, что приводит к изменению характеристик электрода и потере специфических функций.

В качестве образцового электрода для измерения числа pH растворов

используются водородные электроды (рис. 17.8). Электрод представляет собой платиновую пластинку, покрытую слоем платиновой черни, на поверхности которой хорошо сорбируется водород. Платиновая пластинка погружается в раствор, через который пропускается водород под давлением. При образовании первичного преобразователя (электродной системы) из двух водородных электродов, из которых вспомогательный является нормальным, при температуре 20 °С развивается  $E=0,058$  рН, В. На границе раздела анализируемого раствора и раствора нормального электрода возникает диффузионный потенциал, вызывающий ошибку в измерении рН, достигающую 0,05 рН. Необходимость подачи в электрод водорода, отравление платины рядом химических веществ, присутствующих в растворах, обусловили их использование только в качестве образцовых, применяемых в лабораторной практике.

Для измерения числа рН в лабораторных и промышленных условиях используются стеклянные рабочие электроды, широкому распространению которых способствовала простота их устройства, высокие метрологические характеристики и широкий диапазон анализируемых сред. В стеклянных электродах водородными функциями обладает чувствительная тонкостенная мембрана, выполненная из литиевого или натриевого стекла. Согласно одной из наиболее распространенных теорий водородные функции мембраны обусловлены замещением ионов щелочных металлов, находящихся внутри силикатной решетки стекла, более подвижными ионами водорода. Замещение происходит до наступления равновесного состояния. Мембраны из литиевого стекла получили большее распространение вследствие их меньшей восприимчивости к катионам щелочных металлов в растворе, обладающих по сравнению с литием большими размерами ионов.

Принципиальная схема рабочего стеклянного электрода и его эквивалентная электрическая схема представлены на рис. 17.9. Электрод выполнен из толстостенной стеклянной калиброванной трубки 1, к концу которой припаяна чувствительная мембрана из литиевого стекла 2. На внешней поверхности мембраны при погружении ее в

раствор развивается потенциал  $E_3$ , зависящий от активной концентрации ионов водорода. Стеклянный электрод заполнен раствором кислоты постоянной концентрации 3, который замыкает электрическую цепь между мембраной и контактным электродом 4, соединенным с выводным проводом 5. Для обеспечения постоянства потенциала  $E_1$ , возникающего на поверхности контактного электрода 4, используется второй тип электрода, включающего металл, его плохо растворимую соль и раствор, содержащий анионы соли.

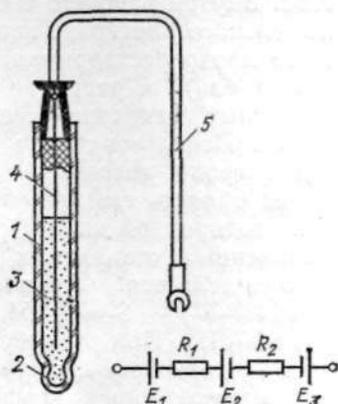


Рис. 17.9. Схема рабочего стеклянного электрода

Поскольку концентрация раствора внутри стеклянного электрода постоянна, потенциал  $E_1$  согласно (17.6) зависит только от температуры раствора. На внутренней поверхности чувствительной мембраны 2 развивается потенциал  $E_2$ , который при постоянной концентрации раствора 3, так же как  $E_1$ , зависит только от температуры. Чувствительная мембрана обладает асимметрией, которая проявляется в виде разности потенциалов на внешней и внутренней ее поверхностях при одинаковых активных концентрациях ионов водорода в растворах внутри и вне электрода.

Эквивалентная электрическая схема помимо рассмотренных выше ЭДС содержит активные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , из которых  $R_1$  соответствует сопротивлению раствора электролита внутри электрода, а  $R_2$  — сопротивлению чувствительной мембраны. Первое сопротивление ничтожно мало по сравнению с сопротивлением мембраны, достигающим  $10^9$  Ом. Это сопро-

тивление зависит от температуры и снижается приблизительно в 2 раза при изменении температуры на каждые пять градусов.

В измерительной практике используются хлорсеребряные, бромсеребряные и каломельные стеклянные электроды. В первых двух электродах в качестве контактного используется серебряный электрод, покрытый слоем плохо растворимой соли хлористого или бромистого серебра ( $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgBr}$ ), при этом электроды заполнены соответственно растворами 0,1 н.  $\text{HCl}$  или 0,05 н.  $\text{HBr}$ . Внутри рабочего стеклянного каломельного электрода находятся ртуть, ее плохо растворимая соль  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  (каломель) и раствор 3,5 н.  $\text{KCl}$ . Контактный электрод вводится внутрь ртути. Использование в каломельном электроде токсичный ртути ограничивает область его применения.

Крутизна водородной характеристики промышленных стеклянных электродов определяется уравнением (ГОСТ 16287-77)  $S_t = -(54,197 + 0,1984t)$ , мВ/рН. При температуре  $20^\circ\text{C}$  чувствительность составляет 58 мВ/рН, температурный коэффициент равен примерно  $0,2 \text{ мВ}/(^\circ\text{C} \cdot \text{рН})$ . Промышленные стеклянные электроды выпускаются в нескольких модификациях, отличающихся диапазоном измерения рН, областью температур и давлений анализируемой среды, верхние их значения составляют по температуре  $150^\circ\text{C}$ , по давлению 1,2 МПа. Для того чтобы стеклянный электрод полностью приобрел водородные функции, его перед включением вымачивают в дистиллированной воде.

В качестве вспомогательных (сравнительных) электродов используют электроды второго типа — хлорсеребряные, реже — каломельные. Схема погружного непроточного вспомогательного хлорсеребряного электрода представлена на рис. 17.10. Корпусом электрода служит толстостенная калиброванная трубка 1, внутри которой находится серебряный электрод 2, погруженный в 3,5 н. раствор  $\text{KCl}$ , содержащий кристаллы хлористого серебра 3. От анализируемого раствора внутренняя полость электрода изолирована резиновыми мембранами 4, в пространстве между которыми находится также 3,5 н. раствор  $\text{KCl}$ . Диффузионный потенциал на поверхности разделительной мембраны 4 достигает 12 мВ. Серебряный контактный электрод подключен к выводу 5. Общее сопротивление электрода не превышает 20 кОм, температурный коэффициент потенциала вспомогательного электрода составляет  $0,25 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ . Непроточные электроды могут использоваться при давлении измеряемой среды до 0,025 МПа.

Для исключения влияния температуры анализируемого раствора на ЭДС вспомогательных электродов последние часто делают выносными с замыканием электрической цепи через электролитический ключ. Схема хлор-

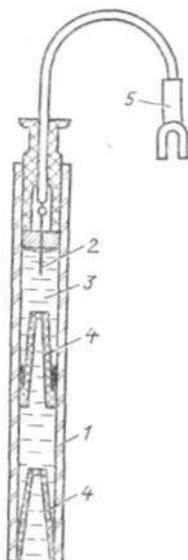


Рис. 17.10. Схема погружного непроточного вспомогательного электрода

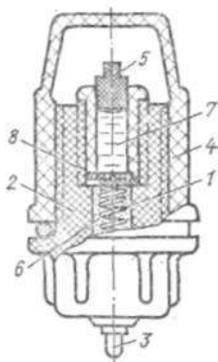


Рис. 17.11. Схема выносного вспомогательного электрода

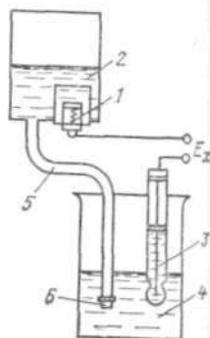


Рис. 17.12. Схема электродной системы рН-метра с выносным вспомогательным электродом

серебряного выносного вспомогательного электрода представлена на рис. 17.11. Контактный серебряный электрод 1 помещен в пластмассовый корпус 2, в нижней части которого находится электрический вывод 3. Электрод показан с навинченной крышкой 4 и пробкой 5, которые используются при транспортировке и хранении электрода. При работе электрода они снимаются и электрод ввинчивается в дно резервуара с насыщенным раствором  $\text{KCl}$ .

Серебряный электрод 1 окружен кристаллами хлористого серебра 6, которые для предотвращения диффузии отделены от насыщенного раствора КСl 7 пористой перегородкой 8. Вспомогательный электрод рассмотренной конструкции работает в цепях с переносом, работа которых сопровождается переходом электролита из одного раствора в другой. В электродной системе, схема которой представлена на рис. 17.12, вспомогательный электрод 1 находится в резервуаре 2, заполненном насыщенным раствором КСl. Электрическая цепь между стеклянным электродом 3, погруженным в анализируемый раствор 4, и вспомогательным электродом 1 замыкается через раствор КСl, стекающий по резиновой трубке 5 в анализируемый

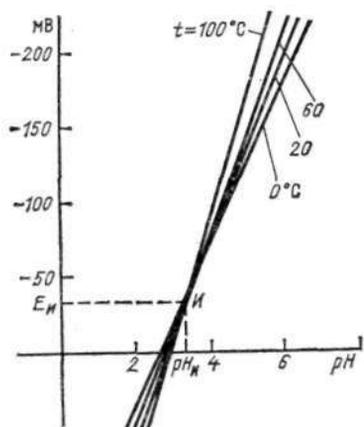


Рис. 17.13. Градуировочная характеристика электродной системы

раствор. На конце трубки 5 находится винт 6 с микропористой прокладкой, с помощью которых устанавливается медленный сток раствора, достигающий 15—30 мл/сутки. Трубка 5 с протоком раствора электролита называется «соляным мостиком» или «электролитическим ключом». Вытекание раствора КСl исключает возможность проникновения посторонних ионов во вспомогательный электрод. Поскольку ионы  $K^+$  и  $Cl^-$  обладают близкими подвижностями, диффузионный потенциал, возникающий на границе двух растворов, незначителен. Выпускаемые модификации отечественных выносных электродов могут работать при давлении анализируемой среды до 0,6 МПа.

Эквивалентная электрическая схема электродной системы кроме рассмот-

ренных выше  $E_1—E_3$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  содержит ЭДС вспомогательного электрода, диффузионную разность потенциалов, суммарное сопротивление вспомогательного электрода и анализируемого раствора. Сопротивление вспомогательного электрода с электролитическим ключом составляет 2—5 кОм.

Общий вид градуировочной характеристики электродной системы рН-метра представлен на рис. 17.13. Результирующая ЭДС, развиваемая электродной системой, зависит от числа рН раствора и его температуры. В точке И ЭДС не зависит от температуры, в связи с чем она называется изопотенциальной. В этой точке влияние температуры раствора на внешний  $E_3$  и внутренние  $E_1$ ,  $E_2$  потенциалы стеклянного электрода взаимно скомпенсировано.

Выпускаемые отечественной промышленностью рабочие стеклянные и вспомогательные электроды стандартизованы (ГОСТ 16287-77, 16286-72). Для одной из промышленных электродных систем МО33328, включающей в себя стеклянный рабочий электрод ЭСП-ОС-14 (3) и выносной вспомогательный насыщенный хлорсеребряный электрод, градуировочная характеристика определяется выражением  $E = -33 - (54,197 + 0,1984t_p) \times (pH - 3,28)$ . Для этой системы координаты изопотенциальной точки составляют  $E_{И} = -33$  мВ,  $pH_{И} = 3,28$ . У других электродных систем координаты изопотенциальной точки различаются, в связи с чем выбор систем должен производиться исходя из диапазона измеряемых значений рН.

В промышленных рН-метрах электродная система снабжается дополнительной арматурой, обеспечивающей размещение электродов на технологических объектах, их контакт с измеряемой средой и защиту электродов от механических воздействий. Как и первичные преобразователи кондуктометров, электродные системы рН-метров выпускаются следующих типов: магистральные (ДМ), погружные (ДПг) и проточные (ДПр). Первые помещаются в трубопровод, по которому протекает анализируемая среда, вторые опускаются в резервуар, а через последние протекает анализируемый раствор из отбора, пройдя устройство подготовки пробы. Схема установки рН-метра с погружным первичным

преобразователем (датчиком) ДПг представлена на рис. 17.14. Преобразователь 1 установлен на крышке резервуара. В анализируемый раствор погружены стеклянный электрод 2 и фторопластовая трубка 3, по которой раствор КСl стекает из бачка 4. В последнем находится вспомогательный выносной электрод. В анализируемый раствор погружен также медный термометр сопротивления 5.

Для подключения электродной системы к измерительному преобразова-

противлением не менее  $10^{12}$  Ом. Таким сопротивлением обладают приборы с высокоомным входом, основанные на компенсационном методе измерения.

Измерительные схемы различных преобразователей рН-метров имеют общие характерные черты, обусловленные видом градуировочных характеристик и их возможными отклонениями. Элементы измерительной схемы должны обеспечивать возможность введения ручной или автоматической температурной компенсации, допу-

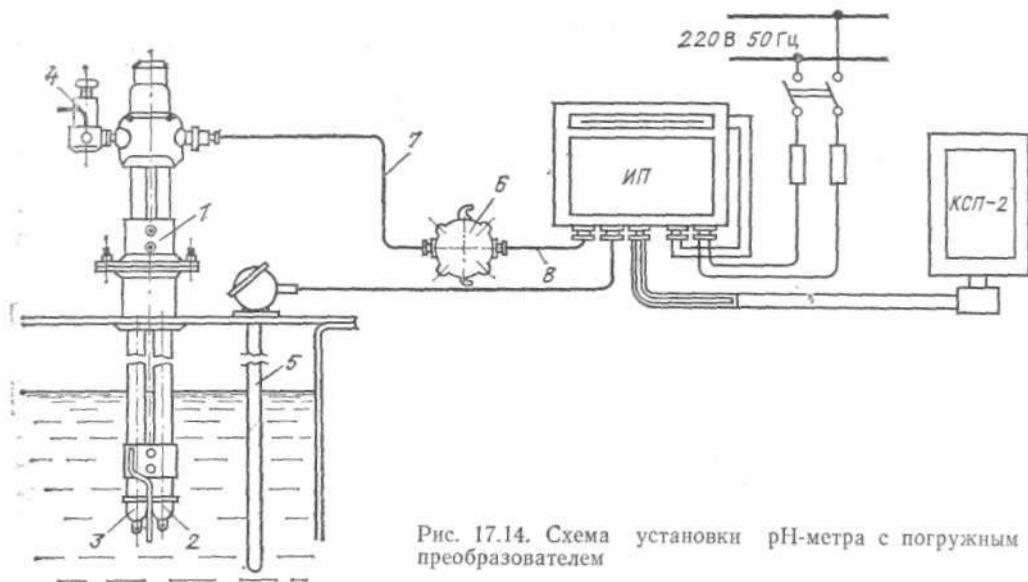


Рис. 17.14. Схема установки рН-метра с погружным преобразователем

телю ИП используется распределительная коробка 6, в которой с помощью специального разъема кабель электродов 7 соединяется с высокочастотным радиотехническим кабелем 8, идущим к измерительному преобразователю ИП. Глубина погружения электродов достигает 2 м, расстояние между первичным и измерительным преобразователями не превышает 150 м.

### 17.7. Измерительные преобразователи рН-метров

Устройство приборов, предназначенных для измерения ЭДС электродной системы, определяется ее значительным внутренним сопротивлением и ограничением по величине протекающего через электроды тока, который для исключения поляризации электродов не должен превышать  $10^{-12}$  А. Учитывая это требование, измерительные приборы должны иметь входное со-

противление не менее  $10^{12}$  Ом. Таким сопротивлением обладают приборы с высокоомным входом, основанные на компенсационном методе измерения.

Измерительные схемы различных преобразователей рН-метров имеют общие характерные черты, обусловленные видом градуировочных характеристик и их возможными отклонениями.

Элементы измерительной схемы должны обеспечивать возможность введения ручной или автоматической температурной компенсации, допу-

скасть коррекцию параметров изопотенциальной точки  $pH_n$ ,  $E_n$  и крутизны градуировочной характеристики. В изопотенциальной точке температурная компенсация должна отсут-

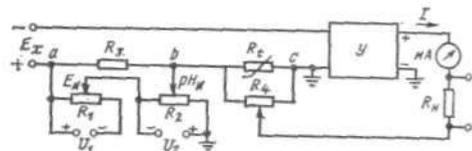


Рис. 17.15. Принципиальная схема измерительного преобразователя рН-метра

стоять. Общие приемы решения этих задач рассмотрим на примере измерительной схемы преобразователя с отрицательной обратной связью, представленной на рис. 17.15.

Сигнал от электродной системы  $E_x$  при большом коэффициенте усиления усилителя практически полностью компенсируется напряжением  $U_{ab}$  и  $U_{bc}$ . Первое снимается с резистора  $R_3$ ,

Таблица 17.5. Значения рН буферных растворов при температуре 25 °С

Буферный раствор	рН	Буферный раствор	рН
0,1 <i>m</i> раствор НСl	1,10	Раствор, содержащий 0,025 <i>m</i> фосфорнокислого однозамещенного калия (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) и 0,025 <i>m</i> фосфорнокислого двузамещенного натрия (Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	6,86
0,05 <i>m</i> раствор тетраоксалата калия (K <sub>2</sub> C <sub>4</sub> O <sub>8</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	1,68	0,01 <i>m</i> раствор тетраборнокислого натрия (Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O)	9,18
Насыщенный при 25 °С раствор виннокислого кислого калия (K <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	3,66	Насыщенный при 25 °С раствор гидрата окиси кальция [Ca(OH) <sub>2</sub> ]	12,45
0,05 <i>m</i> раствор фталевокислого кислого калия (K <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	4,01		

его величина зависит от положения движков переменных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Их взаимное смещение устанавливается таким, чтобы  $U_{ab}$  равнялось  $E_x$ , компенсируя сигнал электродной системы в изопотенциальной точке. Сигнал отрицательной обратной связи снимается с цепи, включающей  $R_4$  и переменный резистор  $R_4$ , с помощью последнего производится настройка прибора при отклонениях крутизны градуировочной характеристики электродной системы. Медный резистор  $R_4$  погружен в анализируемый раствор и осуществляет температурную компенсацию. При увеличении температуры раствора возрастает  $E_x$ , но при этом также увеличивается  $R_4$ , благодаря чему при том же выходном токе обеспечивается соответствующее изменение сигнала компенсации  $U_{bc}$ .

В изопотенциальной точке  $E_x = E_{и} = -U_{ab}$  и сигнал отрицательной обратной связи  $U_{bc}$  должен быть равен нулю при наличии тока на выходе усилителя  $U$ . Выполнение этого условия обеспечивает исключение влияния изменений  $R_4$  в изопотенциальной точке. Для компенсации в изопотенциальной точке выходного тока, протекающего через сопротивления  $R_4$  и  $R_4$ , используется встречно направленный ток, создаваемый между точками  $b$  и  $c$  источником стабилизированного напряжения  $U_2$ . Таким образом, переменный резистор  $R_2$  служит для настройки на изопотенциальную точку рН. Относительно фиксированной точки  $b$  устанавливается движок резистора  $R_1$ , обеспечивая настройку на потенциал  $E_{и}$ . Проверкой правильности настройки преобразователя на координаты изопотенциальной точки является отсутствие изменений выходного тока в изопотенциальной точке при изменении сопротивления  $R_4$ .

Усилители потенциометров и измерительных преобразователей, предназначенных для работы с электродными системами, отличаются высоким входным сопротивлением.

К числу наиболее распространенных отечественных рН-метров относятся приборы рН-201 и рН-261. Их измерительные преобразователи имеют выходные сигналы по постоянному напряжению 0—50 мВ и токовой 0—5 мА. Это обеспечивает возможность их работы в комплекте с автоматическими потенциометрами, устройствами регулирования и контроля, использующими унифицированный токовый сигнал. Прибор рН-201 имеет пять диапазонов измерения числа рН: 1; 2,5; 5; 10; 15, предельная допустимая погрешность составляет  $\pm 1\%$  диапазона измерения.

При выпуске и эксплуатации рН-метров производится как раздельная проверка электродов и измерительных преобразователей, так и комплектов рН-метров в целом. Для воспроизведения шкалы рН водных растворов в диапазоне температур от 0 до 150 °С используются буферные растворы, представляющие собой растворы хорошо диссоциирующих солей слабых кислот и сохраняющих постоянство рН при разбавлении растворов водой и добавлении небольших количеств свободной кислоты или щелочи. В табл. 17.5 для температуры 25 °С приведены рН буферных растворов.

Проверка промышленных стеклянных электродов производится по буферным растворам в комплекте с образцовым электродом сравнения.

Для проверки измерительного преобразователя и его настройки используются высокоомные потенциометры и имитаторы электродной системы.

Рассмотренные выше измерительные преобразователи могут работать в комплекте с мембранными электродами ЭМ, селективными к ионам Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, CN<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>. Ионоселективными функциями по отношению к Na<sup>+</sup> обладают электроды из

натриевого стекла, для подавления их водородной функции в анализируемый раствор вводится буферный аммиачный раствор, стабилизирующий рН. Отечественный определитель натрия рNa-201 имеет диапазон измерения 8,36—5,36 рNa или 0,1—100 мкг/кг Na<sup>+</sup>, погрешность составляет ±0,15 рNa.

Для измерения окислительно-восстановительного потенциала (еН) раствора применяются инертные металлические электроды, на поверхности которых не протекают электродные реакции, а осуществляется лишь контакт с раствором. В отечественных еН-метрах в качестве рабочего электрода используется тонкослойный платиновый электрод, а в качестве электрода сравнения — хлорсеребряный. Поскольку при одинаковых окислительно-восстановительных свойствах еН зависит от рН раствора, обычно измерение первого показателя ведется параллельно с измерением второго.

*Лабораторные потенциометрические преобразователи*, называемые иономерами, являются универсальными приборами, они снабжаются комплектом ионоселективных электродов, позволяющих производить измерение концентрации перечисленных выше ионов. К числу таких приборов относятся иономеры универсальный лабораторный В-741, лабораторные И-115, И-120 и переносной И-102.

### 17.8. Оптический метод анализа состава жидкостей

В оптических анализаторах жидкостей используется связь между параметрами оптического излучения и составом анализируемой жидкости. В общих чертах основы оптического метода анализа рассмотрены в § 16.5. Для анализа состава жидкостей чаще используются рассмотренные ниже следующие разновидности оптического метода: колориметрический, пламенно-фотометрический, турбидиметрический и нефелометрический.

**Колориметрические анализаторы.** В колориметрических анализаторах концентрация определяемого вещества измеряется по поглощению излучения в видимой части спектра анализируемым раствором. Поскольку для измерения излучения используются различные виды фотоэффекта, анализаторы на-

зываются фотоколориметрическими или фотоколориметрами.

В большинстве случаев фотометрируемый окрашенный раствор получается в результате вспомогательной химической реакции, которая обеспечивает избирательное изменение окраски раствора и ее интенсивности в зависимости от концентрации определяемого компонента, при этом в растворе не должно образовываться взвешенных частиц.

В оптический канал между источником излучения и фотоэлементом окрашенный раствор вводится кюветой, выполненной из стекла и обладающей пренебрежимо малыми потерями светового потока из-за поглощения и отражения. Для истинных растворов ослабление излучения на выходе кюветы определяется законом Ламберта — Бера, рассмотренным в § 16.5. Оптическая плотность раствора  $D_\lambda$ , как и газа, зависит от коэффициента спектрального поглощения  $\epsilon_\lambda$ , длины кюветы  $L$  и концентрации измеряемого компонента  $c$ , определяющей интенсивности окраски раствора:

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\epsilon_\lambda L c} = I_{0\lambda} e^{-D_\lambda}, \quad (17.7)$$

где  $I_\lambda$ ,  $I_{0\lambda}$  — интенсивность монохроматического излучения на выходе и входе кюветы.

Если длина кюветы выражается в сантиметрах, а концентрация в г-моль/л, то коэффициент  $\epsilon_\lambda$  в (17.7) называется молярным коэффициентом поглощения. Чем выше  $\epsilon_\lambda$ , тем меньше концентрации компонентов могут быть измерены этим методом. В идеальном случае  $\epsilon_\lambda$  не зависит от концентрации определяемого компонента, т. е. оптическая плотность  $D_\lambda$  линейно растет с увеличением концентрации. Однако в реальных условиях в результате химических реакций между окрашенными частицами и молекулами растворителя наблюдаются отклонения от закона Ламберта — Бера, чаще в сторону снижения молярного коэффициента поглощения. Эти отклонения обусловили необходимость экспериментального определения градуировочной характеристики, связывающей оптическую плотность раствора с концентрацией определяемого компонента.

В качестве лучеприемников в фотоколориметрах используются фоторезисторы, фотоэлементы с внешним и внутренним фотоэффектом, фотоумно-

жители. Их подбирают так, чтобы максимум спектральной характеристики лучеприемника совпадал с экстремумом коэффициента спектрального поглощения анализируемого раствора или был близок к нему.

При проведении колориметрического анализа различают чувствительность фотометрической реакции и чувствительность метода в целом. Первая зависит от выбора реактива и условий реакции, вторая определяется средствами и способом измерения оптической плотности, условиями приготовления реактивов, наличием мешающих примесей. Полнота перевода определяемого вещества в окрашенный комплекс зависит от pH раствора, поэтому его контроль часто осуществляется при приготовлении рабочего раствора. В выпускаемых в настоящее время отечественных и зарубежных фотоколориметрах используются различные варианты одно- и двухканальных оптических систем.

Автоматические фотоколориметрические приборы являются сложными устройствами периодического действия. Они содержат значительное число электрических клапанов, микронасосы, включаемые по команде программного управляющего устройства. Однако благодаря высокой разрешающей способности и универсальности они получают все более широкое распространение для избирательного измерения микроконцентраций различных веществ, находящихся в растворах.

К числу фотоколориметрических приборов относятся автоматические кремнемеры, жесткомеры, фосфатометры, измерители растворенного в воде кислорода, хлора и др.

На рис. 17.16 представлена схема автоматического кремнемера АВ-211, предназначенного для измерения концентрации ионов  $\text{SiO}_3^{2-}$  и используемого на тепловых и атомных электрических станциях при контроле качества химически обессоленной воды. Кремнемер содержит несколько блоков: гидравлический 1, фотометрический с двухканальной оптической системой 2, управления 3, усилительный 4. В комплект кремнемера входит потенциометр 5, нормирующий преобразователь 6, осуществляющий преобразование изменения сопротивления в токовый унифицированный сигнал, измеряемый вторичным прибором ВП — автоматическим миллиамперметром КСУ-2, отградуированным в  $\text{мкг/кг SiO}_3^{2-}$ .

В кремнемере анализируемая вода поступает в сосуд постоянного уровня 7 через входной регулирующий вентиль 8. Под постоянным напором вода попадает в дозатор 10 при от-

крытом электромагнитном клапане 9. К линии подачи воды через запорные вентили подключены бачки 11, в которых находятся стандартные растворы: «нулевой» и с максимальной концентрацией определяемого компонента. В сосудах 12 находятся молибдат аммония, серная кислота и восстановитель. В смесителе 13 образуется реagentный раствор, меняющий свою окраску и ее интенсивность в присутствии ионов  $\text{SiO}_3^{2-}$ . Блок фотометра 2 включает измерительную кювету 14, источник света 15, линзы 16, светофильтры 17, призму 18, фотодiodы 19, 20, оптический клин 21, перемещаемый реверсивным двигателем 22.

Процесс измерения распадается на две стадии. Во время первой производится установка нуля и осуществляется балансировка оптиче-

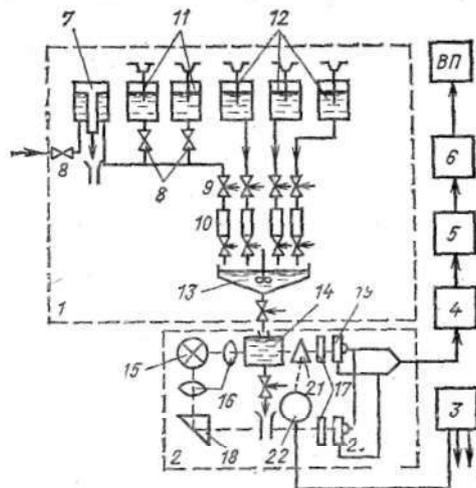


Рис. 17.16. Схема автоматического кремнемера АВ-211

ской системы при наличии «нулевой пробы» в измерительной кювете. При выполнении этой стадии по команде от блока управления 3 все три реактива, находящиеся в сосудах 12, и «нулевой» раствор из сосуда 11 поступают в дозаторы 10. Затем в смесительную камеру сливаются молибдат аммония и серная кислота, тщательно перемешиваются в течение нескольких минут, после чего к ним добавляется доза «нулевого» раствора, а затем восстановитель. После перемешивания и образования кремнемолибденового комплекса раствор сливается в измерительную кювету. При выполнении этой стадии к выходу усилителя 4 подключен реверсивный двигатель 22, который балансирует измерительную схему путем перемещения оптического клина 21.

Благодаря проведению этой операции корректируется влияние загрязненности кюветы и несимметрии характеристик фотоэлементов. После установки нуля раствор из кюветы сливается.

При переходе к стадии измерения одновременно с молибдатом аммония и серной кислотой в смеситель 13 вводится анализируемый раствор, а через несколько минут восстановитель. После перемешивания раствор поступает в измерительную кювету 14. В процессе измерения реверсивный двигатель отключается от оптического клина. Усиленный сигнал небалан-

са, пропорциональный оптической плотности раствора, измеряется потенциометрическим устройством 5 со встроенным реостатом и преобразуется в изменение сопротивления, его значение сохраняется до следующего цикла измерения. С помощью преобразователя ПТ-ТС-68 изменения сопротивления преобразуются в унифицированный токовый сигнал. Цикл измерения, включающий обе стадии, в кремнемере АВ-211 продолжается 30 мин. Диапазон измерения кремнемера составляет 0—60 и 0—500 мкг/кг  $\text{SiO}_3^{2-}$ , предельная приведенная погрешность  $\pm 7\%$ . Расход каждого из реагентов — по 0,5 л/сут, расход пробы 300 мл/мин.

К числу фотоколориметрических приборов относится жесткомер АВ-210, предназначенный для измерения микроконцентраций ионов кальция и магния. В качестве вспомогательной реакции используется реакция между ионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  с хромом темно-синим в присутствии боратного буферного раствора. В результате реакции проба приобретает красную окраску. Поскольку используемые в приборе реактивы характеризуются высокой чистотой, отсутствует необходимость введения коррекции на колебания оптической плотности реагента. В жесткомере используется одноканальная оптическая система, в качестве лучеприемника применяется фотоумножитель. Выходные элементы у жесткомера АВ-210 те же, что и у кремнемера АВ-211: автоматический потенциометр КПП, нормирующий преобразователь ПТ-ТС-68. Диапазон измерения жесткомера АВ-210 составляет 0—30 мкг-экв/кг, предельная погрешность равна  $\pm 7\%$ , расход пробы до 400 мл/мин, расход каждого из реагентов 0,5 л/сут, продолжительность цикла 6 мин.

К числу наиболее чувствительных анализаторов жидкостей относятся *пламенно-фотометрические приборы*. Их принцип действия основан на способности возбужденных атомов излучать в определенной части спектра. Поскольку спектр излучения зависит от строения атомов или молекул, этот метод обладает высокой специфичностью и чувствительностью. Количественная связь между интенсивностью спектральных линий  $I_0$  и концентрацией вещества  $c$  определяется уравнением Ломакина — Шейбе

$$I_0 = ac^d, \lg I_0 = \lg a + d \lg c,$$

где  $a, d$  — коэффициенты, зависящие от характеристик источника света и исследуемого вещества.

Градуировочная характеристика определяется экспериментально по стандартным растворам, близким по составу к анализируемым. Воспроизводимость градуировочной характеристики зависит от тщательности соблюдения условий измерения.

Для возбуждения атомов и молекул могут использоваться дуга, искровая разряд, пламя. Атомы щелочных металлов имеют низкий потенциал возбуждения, поэтому при их анализе применяют пламя, что обеспечивает также простоту анализируемого спектра. В пламенной фотометрии используются различные газы: ацетилен, водород, пропан, бутан.

Чувствительность метода в значительной степени зависит от температуры пламени, определяющей степени возбуждения атомов. В качестве измерительных элементов используются фотоумножители. Этот метод обладает большой чувствительностью по отношению к атомам щелочных металлов, превышающей чувствительность других химических методов.

**Турбидиметрические и нефелометрические анализаторы.** Принцип действия турбидиметрических<sup>1</sup> и нефелометрических приборов основан на измерении ослабленного или рассеянного излучения взвешенными частицами, находящимися в жидкости.

При прохождении светового потока  $I_0$  через раствор, содержащий взвешенные частицы, поток ослабляется за счет поглощения его раствором и частицами. Если пренебречь поглощением потока растворителем, то между световым потоком  $I_0$  на входе анализируемого раствора и потоком  $I$  на его выходе существует следующее соотношение:

$$\lg \frac{I_0}{I} = kcbd^2/(d^2 + a\lambda^4),$$

где  $c, d$  — концентрация взвешенных частиц и их диаметр;  $k, a$  — постоянные, зависящие от характера суспензии и способа измерения;  $b$  — длина поглощающего слоя;  $\lambda$  — длина волны.

При фиксированных условиях измерения, виде раствора и взвеси  $k, d, a, \lambda$  являются постоянными и  $\lg(I_0/I)$  принимает вид закона Ламберта — Бера:

$$\lg(I_0/I) = k_1 bc.$$

<sup>1</sup> От слова turbid (англ.) — мутный.

Градуировка турбидиметров производится по стандартным растворам, содержащим известную концентрацию взвешенных частиц, имеющих размеры и природу, близкие к анализируемым. Следует отметить, что на результаты измерения большое влияние оказывает присутствие посторонних электролитов и неэлектролитов, коллоидов, стабильность дисперсности частиц. В связи с этим метод не обеспечивает высокой точности измерения.

Турбидиметрические анализаторы используются для измерения мутности питьевой и сбросных вод, уровней шлама в отстойниках и технологических аппаратах, концентрации частиц в суспензиях. При измерении концентрации взвешенных частиц в технологических аппаратах и линиях световой поток пропускается непосредственно через слой анализируемой жидкости внутри технологического оборудования. К числу таких приборов относится сигнализатор уровня шлама СУШ, используемый при водоочистке в аппаратах, называемых осветлителями, в которых производится предварительная очистка воды. В процессе очистки образуется выводимый из аппарата шлам. Фотоэлектронный сигнализатор уровня содержит источник излучения и фоторезистор, воспринимающий излучение. Поскольку при появлении шлама в воде на пути светового потока резко снижается освещенность фоторезисторов, возникает сигнал небаланса измерительной схемы, который подается на устройство сигнализации либо в цепь автоматической продувки аппарата.

Турбидиметрические анализаторы мутности воды ТВ имеют диапазон измерения от 0—3 до 0—500 мг/л, погрешность измерения не превышает  $\pm 2\%$ .

**Нефелометрические анализаторы.** В нефелометрических анализаторах интенсивность потока излучения, рассеиваемого частицами, находящимися в растворе, определяется уравнением Релея в следующей упрощенной форме:

$$I_p = I_0 kNV/\lambda^4,$$

где  $I_0$ ,  $I_p$  — начальный и рассеянный потоки излучения;  $V$ ,  $N$  — объем шаровой частицы и их число;  $\lambda$  — длина волны;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Как и в турбидиметрических приборах, показания нефелометров существенно зависят от условий проведения измерений, формы частиц и их дисперсности. С уменьшением длины волны интенсивность рассеиваемого потока излучения возрастает. Градуировка нефелометров производится по стандартным смесям, причем дисперсность и природа частиц раствора должны быть близки к анализируемым.

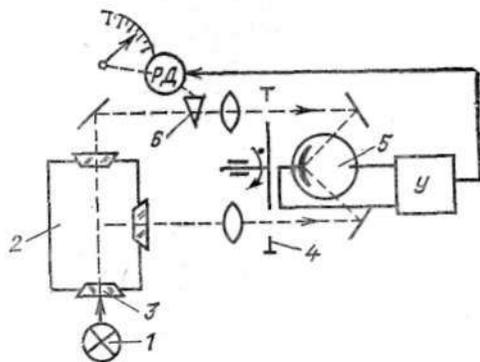


Рис. 17.17. Принципиальная схема нефелометра

Нефелометры в основном используются для анализа эмульсий и в частности для анализа содержания нефтепродуктов в сбросных водах [26]. Принципиальная схема нефелометра с двойным оптическим каналом представлена на рис. 17.17. От источника 1 поток света проходит через измерительную камеру 2, снабженную стеклянными окнами 3. Прошедший через камеру 2 световой поток направляется в канал сравнения, а рассеянный — в измерительный канал. Оба потока с помощью обтюратора 4 попеременно попадают на фотоземлет 5. Разность между рассеянным потоком и потоком сравнения зависит от концентрации взвешенных частиц. В нефелометрах используется принцип компенсации световых потоков, для чего при наличии их небаланса реверсивный двигатель У, подключенный к выходу усилителя У, перемещает показывающую стрелку прибора и оптический клин 6, выравнивая световые потоки.

### 17.9. Измерение концентрации газов, растворенных в воде и паре

С задачей измерения концентрации растворенных в воде газов встречаются как в промышленности, например при контроле теплоносителя на тепловых и атомных электростанциях, так и при анализе состояния вод в водоемах и отстойниках.

**Измерение растворенного в воде кислорода.** В зависимости от концентрации растворенного в воде кислорода для его измерения используется не-

сколько методов. Для анализа микроконцентраций растворенного кислорода используются вольтамперметрические (амперметрические), кондуктометрические и колориметрические методы. При концентрациях, составляющих мг/л, используется термокондуктометрический метод.

Вольтамперметрические кислородомеры относятся к электрохимическим анализаторам, принцип действия которых основан на измерении тока, протекающего через поляризованную электродную систему при наличии деполяризатора — кислорода. Теоретические основы этого метода измерения были подробно рассмотрены в § 16.9, поскольку метод используется также при анализе состава газов.

Как отмечалось выше, действующее напряжение  $E$  в цепи, содержащей погруженные в раствор электроды, может создаваться за счет внешнего или внутреннего источника, последним служит гальваническая пара электродов. В кислородомерах этот источник сигнала используется чаще. Поляризованным электродом в приборах служит твердый катод, на котором происходит восстановление кислорода. В качестве материала катода используются золото, серебро, палладий, платина. Для сохранения постоянства характеристик прибора электроды не должны загрязняться продуктами электролиза. Для защиты электродов от анализируемой среды и обеспечения малого сопротивления электролита между электродами последние помещаются в фоновый электролит, индифферентный по отношению к электродам.

В промышленных кислородомерах используются открытые электродные системы или закрытые полимерной мембраной. В первом случае кислород из анализируемой воды передается фоновому электролиту с помощью газопередающей системы. Во втором случае анализируемая вода омывает защищенную мембраной электродную систему. В качестве фонового электролита используется щелочной буферный раствор с  $pH=8-10$ . В таких средах скорость восстановления кислорода на катоде на три порядка выше, чем в кислом электролите.

Схема автоматического кислородомера с газопередающей системой типа ИКАР приведена на рис. 17.18. Анализируемая вода через гид-

розатор 1 и электрический клапан 2 подается в десорбер 3, откуда через гидрозатор 4 сбрасывается в дренаж. В десорбере 3 через анализируемую воду пробулькивает чистый водород, в который переходит кислород, растворенный в воде. Следует отметить, что коэффициент Генри для кислорода, представляющий собой отношение равновесных концентраций  $O_2$  в газе и воде, равен 35.

Водород, обогащенный кислородом, пробулькивает через фоновый раствор электродного первичного преобразователя 5, вызывая его циркуляцию и обогащение кислородом. В качестве анода в электродном преобразователе 5 используется электрод из платнированной платины, который в фоновом буферном растворе с  $pH=9,2$  представляет собой идеальный водородный электрод, развивающий потенциал 0,54 В. Золотой катод обладает селективностью по отношению к кислороду, и его потенциал зависит только от концентрации кислорода в растворе.

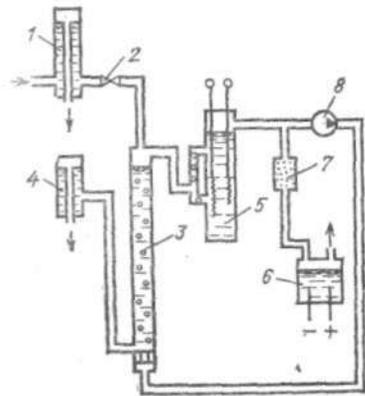


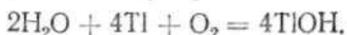
Рис. 17.18. Схема амперметрического кислородомера ИКАР.

Водород, циркулирующий в приборе, образуется в электролизере 6, заполненном КОН, выделяющийся при этом на аноде кислород сбрасывается в атмосферу. Водород после очистки в палладиевом катализаторе 7 поступает на всас мембранного вибрационного насоса 8, создающего циркуляцию водорода в системе. Для градуировки прибора используется кислород, полученный в электролизере, не показанном на схеме. В комплект ИКАР входят усилитель поляризационного тока, имеющий на выходе унифицированный токовый сигнал, и автоматический миллиамперметр. Пределы измерения кислородомера составляют 0—50; 0—100; 0—200 мкг/кг  $O_2$ , для первого диапазона измерения предельная погрешность равна  $\pm 10\%$ , для последующих  $\pm 5\%$ . Аналогичные по принципу действия кислородомеры Марк III выпускаются фирмой «Кембридж».

При использовании для защиты электродной системы кислородопроницаемой мембраны упрощается конструкция прибора и снижается его инерционность.

В кислородомерах АК-300 для измерения концентрации растворенного в воде кислорода используется кон-

дуктометрический метод, основанный на образовании свободным кислородом с металлическим таллием гидроксиды, изменяющей при диссоциации удельную электропроводность воды:



Принципиальная гидравлическая и электрическая схемы кислородомера представлены на рис. 17.19. Анализируемый раствор, прошедший предварительную подготовку, поступает на фильтр смешанного действия 1, где производится снижение исходной электропроводности пробы до 0,05 мкСм/см. Обессоленная проба пропускается через кондуктометрический преобразователь 2, а затем поступает в патрон

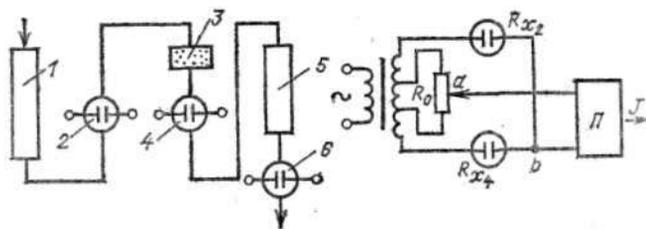


Рис. 17.19. Схема автоматического кислородомера АК-300

3, заполненный металлическим таллием. Изменение электропроводности пробы после таллиевого патрона фиксируется кондуктометрическим преобразователем 4. Для очистки воды от продуктов таллия на выходе прибора установлены фильтр 5 и контрольный кондуктометрический преобразователь 6.

Измерительная схема кислородомера представляет собой мост, в который по дифференциальной схеме включены кондуктометрические преобразователи 2 и 4. Поскольку изменение сопротивления преобразователя 4 обусловлено концентрацией кислорода, небаланс моста  $U_{ab}$  является функцией той же величины. Сигнал небаланса  $U_{ab}$  поступает на преобразователь П, имеющий на выходе унифицированный токовый сигнал. Изменение электропроводности исходной воды, влияя на сопротивление обоих преобразователей 2, 4, не вызывает изменения небаланса моста. Наличие фильтра 1, снижающего электропроводность анализируемого раствора, повышает чувствительность измерительной схемы. Диапазон измерения кислородомера АК-300 составляет 0—30 мг/кг при

предельной погрешности  $\pm 6\%$ , время установления показаний не превышает 10 мин, расход пробы равен  $35 \pm 5$  мл/мин.

Концентрация водорода в свежем паре на выходе пароперегревателей котлов характеризует интенсивность протекания процесса коррозии поверхностей нагрева. В связи с этим автоматические водородомеры получают все более широкое распространение на тепловых электрических станциях. Зарубежной и отечественной промышленностью выпускаются термокондуктометрические водородомеры, осуществляющие контроль концентрации водорода в конденсате перегретого пара.

Принцип действия водородомеров основан на отличии теплопроводности водорода от теплопроводности других газов, в частности кислорода. Этот принцип широко используется в тепловых газоанализаторах для измерения концентрации  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  в газовых смесях, в связи с чем он подробно рассмотрен в § 16.3. Схема автоматического водородомера представлена на рис. 17.20. Анализируемый конденсат, прошедший устройство подготовки пробы, через сосуд постоянного уровня 1, создающего фиксированный напор, и вентиль 2 стекает в десорбер 3 по трубкам 4, увеличивающим поверхность контакта конденсата с кислородом. Последний поступает из электролизера 5; водород из конденсата выделяется в десорбер 3. Смесь газов поступает в измерительную камеру прибора, содержащую нагретую платиновую проволоку  $R_1$ . Температура проволоки зависит от теплопроводности газа, находящегося в камере. Поскольку теплопроводность водорода в несколько раз больше теплопроводности кислорода, теплопередача от проволоки к стенкам камеры, а следовательно, и сопротивление  $R_1$  будут

определяться концентрацией водорода в кислороде.

Для снижения влияния температуры стенок камеры на показания прибора служит плечо сравнения  $R_2$ , аналогичное  $R_1$  и находящееся в камере, заполненной кислородом. Остальные плечи моста  $R_3$  и  $R_4$  представляет собой постоянные резисторы; переменный резистор  $R_0$  служит для начальной балансировки моста. Мост питается от источника стабилизированного питания ИПС, сигнал небаланса измеряется с помощью вторичного прибора ВП.

В автоматическом водородомере АВ-201, как и жесткомере АВ-210 и кремнемере АВ-211, усиленный неба-

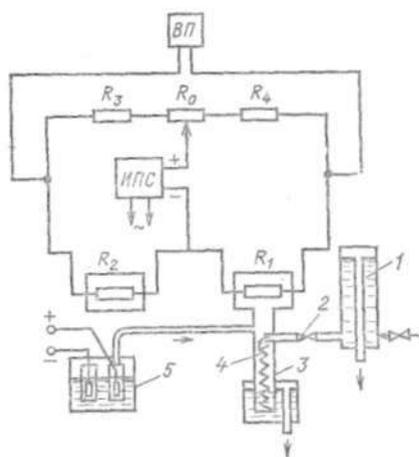


Рис. 17.20. Схема автоматического водородомера

ланс моста подается на вход нормирующего преобразователя, имеющего на выходе унифицированный токовый сигнал, который измеряется автоматическим миллиамперметром КСУ, отградуированном в  $\text{мкг/кг H}_2$ . Градуировка прибора периодически проверяется по известной концентрации водорода, получаемого от электролизера 5. Диапазон измерения водородомера составляет 0—20 и 0—200  $\text{мкг/кг H}_2$ , предельная погрешность не превышает  $\pm 6\%$ , время установления показаний равно 30 мин, расход пробы  $180 \pm 20$  мл/мин. Приборы, подобные рассмотренному, выпускаются фирмой «Кембридж». В термокондуктометрических кислородомерах растворенный в воде кислород выделяется в водород, полученный в электролизере; из-

мерительная схема прибора совпадает с рассмотренной.

### 17.10. Эксплуатация анализаторов состава жидкостей и их вспомогательных устройств

Анализаторы состава жидкостей в большей мере, чем другие первичные приборы, требуют правильного выбора точек отбора проб, жесткого соблюдения условий транспортировки и подготовки пробы, квалифицированного и своевременного проведения технического обслуживания, предусмотренного документацией на анализаторы и вспомогательные устройства.

У рассмотренных выше анализаторов жидкостей при соответствующих параметрах среды по температуре и давлению первичные преобразователи могут вводиться непосредственно в технологические объекты. К их числу относятся магистральные и погружные преобразователи кондуктометров, рН-метров. Хотя при этом отсутствуют помехи, вызванные транспортировкой и подготовкой пробы, тем не менее и в этом случае возможно получение не представительных результатов измерения. Они вызываются неоднородностью состава жидкости по высоте резервуара или сечению трубопровода. Последнее более вероятно при ламинарном течении потока, чем при турбулентном. Наличие температурного градиента по длине и высоте резервуара, размещение преобразователей вблизи точек ввода потоков также может быть причиной отклонений показаний от действительных значений измеряемых величин. Все сказанное выше распространяется на правила установки отборных устройств, с помощью которых анализируемая жидкость выводится из трубопровода или резервуара. Поскольку параметры и состав отбираемых жидкостей могут быть самыми разнообразными, набор существующих вспомогательных устройств обеспечивает снижение температуры и давления, очистку пробы от механических и мешающих примесей, создание постоянного расхода.

**Отборные устройства.** Для отбора пробы гомогенной среды, движущейся в трубопроводе, используется трубчатый зонд, схема которого для отбора пробы перегретого пара представлена на рис. 17.21. Трубка со скосом  $45^\circ$  на-

встречу потоку имеет глубину погружения до 20 мм. С увеличением глубины погружения растут механические усилия, действующие со стороны потока на зонд.

При необходимости усреднения пробы по сечению трубопровода используются щелевые зонды (рис. 17.22). Отбор осуществляется с помощью отверстий в трубке, их общее сечение составляет половину сечения трубки зонда. Для отбора представительной пробы скорости движения среды в зонде и в трубопроводе должны совпадать. При анализе состава насыщенного пара отбор необходимо проводить в таком сечении трубок, где не проявляется

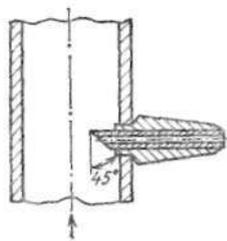


Рис. 17.21. Схема трубчатого зонда

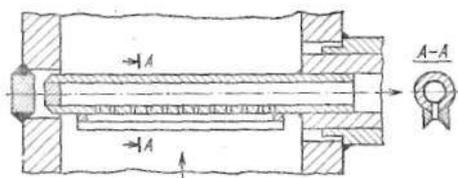


Рис. 17.22. Схема щелевого зонда

ся эффекта сепарации влаги стенками. Это требование объясняется тем, что концентрации примесей в паровой и жидкой фазах различны и требуется производить отбор усредненной пробы. В качестве таких сечений выбираются трубопроводы на выходе барабанов котлов, сепараторов или сечения с высокими скоростями движения пара, где эффект сепарации влаги стенками не наблюдается. Для получения искусственной высокой скорости движения пара в месте расположения зонда используются трубы Вентури. Зонд устанавливается после суженной части трубы, где влажность пара выравнивается по сечению в результате отрыва пленки влаги от стенок трубопровода и дробления капель. Скорость пробы в зондах для насыщенного пара также должна совпадать со скоростью движения пара в трубопроводе.

Для первоначального отделения от анализируемой жидкости механических примесей используются сетчатые фильтры, окружающие отборную трубку. Для периодической очистки сетки предусматривается возможность пропуски через нее встречно направленного потока. Линии, через которые проба из отборного устройства поступает на вспомогательные устройства и анализатор, не должны иметь горизонтальных участков, чтобы в них не собирался шлам, газы. Минимальный угол наклона трубок в сторону продувочного вентиля или отстойника должен быть не менее  $10^\circ$ . Материал линий определяется составом анализируемого вещества. Так, протекание процессов коррозии в линиях может уменьшить концентрацию кислорода в пробе по сравнению с исходной водой. В подобных случаях линии выполняются из коррозионно-стойких материалов. Для линий анализаторов жидкостей в основном используются бесшовные жесткотянутые и холоднокатанные трубы из стали 10 или бесшовные из нержавеющей стали с наружным диаметром 14—16 мм.

При анализе концентрации растворенных в воде или конденсате газов должна быть исключена возможность контакта пробы с атмосферой. Следует учитывать также, что наличие последней может привести к погрешностям в оценке рН и электропроводности за счет десорбции  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$  в воздух.

**Устройства подготовки пробы.** Для снижения давления пробы используют наборы дроссельных шайб, трубки с малым внутренним диаметром — ламинарные дроссели, регулировочные вентили. При анализе пара на содержание кремнекислоты холодильники должны размещаться перед дросселем, так как при снижении давления наблюдается выделение кремнекислоты и в анализаторы попадает обедненная проба. Таким образом, результаты анализа могут зависеть от взаимного расположения вспомогательных устройств, что следует учитывать при их компоновке.

Для снижения температуры пробы используются змеевиковые противоточные холодильники с расходом охлаждающей воды до 300 л/ч. В число устройств подготовки пробы могут входить сепараторы для удаления раство-

ренных газов и различного рода фильтры для удаления механических и мешающих примесей. Так, при измерении удельной электропроводности конденсата, содержащего растворенный аммиак и гидразин, используют предвключенный Н-катионитовый фильтр. В кондуктометрических кислородомерах применяется предвключенный фильтр смешанного действия.

При отборе проб жидкостей или пара, находящихся под давлением, побудителей расхода не требуется, поскольку среды движутся самотеком и производится только стабилизация их расхода путем использования сосудов с перетоком, называемых напорными.

В анализаторах жидкостей используются разнообразные побудители расхода: диафрагменные, ротационные, перестальтические. Визуальный контроль за постоянством расхода обычно осуществляется ротаметрами.

В настоящее время имеют место два способа размещения анализаторов на технологических объектах. В одном случае анализаторы размещаются на минимальном расстоянии от точек отбора проб, что обеспечивает малое запаздывание и снижение погрешностей, обусловленных передачей пробы по длинным линиям. При этом приборы находятся в разных точках технологических объектов, на них влияют меняющиеся внешние воздействия, их обслуживание более трудоемко.

В другом случае, учитывая сложность анализаторов и их высокие требования к условиям и уровню эксплуатации, приборы размещают в специальном помещении с регулируемым микроклиматом. При этом используются проточные первичные преобразователи и автоматизированные системы подготовки пробы. Это повышает надежность и качество работы приборов, упрощает их обслуживание, хотя первоначальные затраты на установку приборов возрастают.

На тепловых и атомных электрических станциях для подготовки проб используются устройства УПП (рис. 17.23). Из пробоотборного зонда 1 анализируемая проба последовательно проходит следующие устройства: за-

порный клапан 2, холодильник 3, регулировочный клапан 4, набор дроссельных шайб 5, водяной холодильник 6, электромагнитный клапан 7, бачок постоянного уровня 8. Температура в бачке измеряется контактным термометром, при достижении отметки 40 °С термоограничитель 9 сигнализирует о превышении температуры и закрывает клапан 7, прекращая подачу пробы в анализатор. Комплект устройств обеспечивает подачу пробы до 25 л/ч температурой 35 °С и давлением 0,14 МПа.

Автоматический химический контроль теплоносителя первого контура АЭС с реакторами ВВЭР затруднен высоким уровнем радиоактивности,

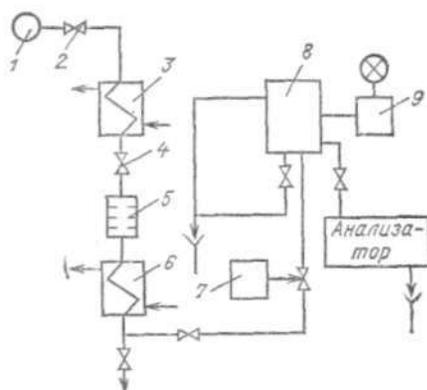


Рис. 17.23. Схема устройства подготовки пробы

значительным количеством растворенного водорода и азота, высокой концентрацией борной кислоты. Отбор и подготовка проб для анализаторов химического контроля теплоносителя второго контура АЭС с реакторами ВВЭР не имеет особенностей по сравнению с тепловыми станциями сверхкритического давления.

Отбор и подготовка пробы при химическом контроле теплоносителя в реакторах РБМК производятся, как на тепловых электростанциях. Отличие состоит в том, что выпар из бачка постоянного уровня УПП направляется в систему газовых сдувок. Техническое обслуживание и ремонт анализаторов осуществляются в соответствии с действующими на АЭС правилами.

### 18.1. Информационно-измерительная подсистема АСУ ТП

Рассмотренные выше средства измерения теплотехнических величин используются в системах управления технологическими объектами, при теплотехнических исследованиях, контроле воздушного и водного бассейнов. Эффективность применения того или иного средства измерения зависит от согласованности его характеристик с характеристиками остальных элементов систем управления и контроля, соответствия условий эксплуатации условиям, предусмотренным технической документацией. Это определяет необходимость использования системного подхода к выбору средств измерения как одного из элементов системы, выполняющей ту или иную целевую функцию.

Структура автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и ее место в общей системе управления предприятием зависят от вида последнего, разновидности технологического объекта и используемых средств контроля и автоматизации. Среди промышленных предприятий наибольшей общностью технологического оборудования, используемых средств автоматизации и структур управления обладают тепловые и атомные электрические станции, на которых наиболее сложными технологическими объектами являются энергоблоки, включающие в себя котлы, реакторы, турбогенераторы и вспомогательное оборудование. Высокие скорости и параметры теплоносителя (давление достигает 36 МПа, температура 545 °С), большие единичные мощности, непрерывный характер производства обусловили необходимость создания для ведения технологических процессов энергоблоков одной из наиболее сложных в промышленности систем управления. Так, система управления энергоблоком 800 МВт включает в себя более 1600 контролируемых па-

раметров, свыше 1000 регулирующих блоков, 120 локальных контуров регулирования. Качественный рост контролируемых и регулируемых величин обусловил качественное изменение структуры АСУ ТП, выразившееся в использовании информационных и управляющих вычислительных машин, функционально-группового управления. АСУ ТП энергоблоков представляет собой человеко-машинный комплекс, в структуру которого входят следующие подсистемы: информационно-измерительная, технологической сигнализации, дистанционного и автоматического управления, автоматического регулирования и технологических защит [27—29]. Работа подсистем контролируется оператором с блочного щита управления (БЩУ), построение системы управления предусматривает возможность его вмешательства в работу любой подсистемы.

В рассмотренной структуре на измерительной информации от первичных приборов непосредственно базируется работа четырех из пяти подсистем. Обращение оператора к подсистеме дистанционного управления также в большинстве случаев опирается на информацию о состоянии объекта и ходе технологического процесса.

В зависимости от важности измеряемого параметра и сложности технологического объекта используются несколько способов передачи, преобразования и представления измерительной информации оператору (рис. 18.1). Рассматриваемые структуры применяются на технических объектах различной сложности, имеющих щиты управления (ЩУ). Ввиду большого распространения электрических систем передачи преобразования и представления информации, приведенные структуры относятся к системам этого типа. Те же принципы используются при построении систем контроля, основанных на пневматическом унифицированном сигнале, отличие состоит лишь в типах используемых технических

средств и включении таких дополнительных элементов, как пневмоэлектрические и электропневматические преобразователи.

С помощью первичных приборов и преобразователей ПП (термометров сопротивления, термоэлектрических термометров, преобразователей давления, разности давлений, расхода, анализаторов состава жидкостей и газов), рассмотренных выше, производится измерение и преобразование соответ-

приборов относятся манометры, дифманометры, манометрические термометры. В случае, если щит управления находится вблизи объекта, приборы 2 могут размещаться на щите, если это допускается правилами технической эксплуатации.

При множественном контроле однородных параметров в системе III для измерения сигналов первичных преобразователей используется один вторичный показывающий или самопишущий прибор 3. Коммутация его входных цепей осуществляется ручными или автоматическими переключателями П, последние обычно встраиваются во вторичный прибор. Три рассмотренные системы передачи и преобразования сигналов используются в системах управления объектами любой сложности. У наиболее простых объектов на их основе осуществляется представление всей информации о ходе технологического процесса и состоянии оборудования.

Следующая ступень развития измерительной системы связана с усложнением технологических объектов и увеличением объема информации, необходимой для их управления. Представление информации с помощью рассмотренных выше систем I—III сопровождается увеличением площади щитов, занятых вторичными приборами, и с учетом возможности оператора по восприятию информации осуществляется в ограниченных пределах. В связи с этим при использовании индивидуального контроля I наиболее ответственных величин, а также систем II, III основная масса параметров измеряется с помощью системы IV централизованного контроля СЦК. При использовании системы информация представляется с помощью аналоговых многошкальных приборов ППМ, цифровых индикаторов ЦИ и регистрируется электрическими печатающими устройствами ПУ.

В системе IV унифицированные токовые сигналы от ПП или нормирующих преобразователей НП поступают на коммутирующее устройство К, с выхода которого сигналы подаются либо на потенциометры ППМ, либо после аналого-цифрового преобразователя АЦП — на цифровые индикаторы ЦИ или электрические печатающие устройства ПУ. Последние осуществляют выборочную регистрацию

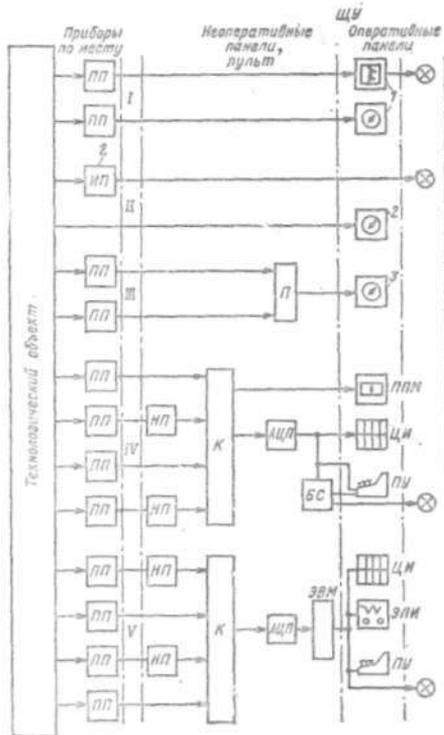


Рис. 18.1. Структура информационно-измерительной подсистемы АСУ ТП

ствующих величин в электрические аналоговые сигналы.

К системе индивидуального контроля параметров относится система I, в которой сигналы от первичных приборов и преобразователей ПП поступают на показывающие или самопишущие вторичные приборы 1, с помощью которых может также осуществляться сигнализация предельных отклонений контролируемых величин. К системе индивидуального контроля II относятся устанавливаемые у технологического объекта показывающие и самопишущие приборы 2, от которых сигнал об отклонении параметра поступает на щит управления. К числу таких

параметров и их отклонений от заданного значения. Сопоставление параметров с заданным значением осуществляется в блоке сравнения БС. При выходе параметра из области допускаемых значений производится регистрация отклонения и его сигнализация.

Использование СЦК освобождает оператора от постоянного контроля за большей частью измеряемых величин. В системе производится периодический опрос контролируемых параметров. При наличии отклонения оператор, оповещенный системой сигнализации, вызывает параметр на многошкальный потенциометр или цифровой индикатор.

К принципу действия СЦК близок принцип действия машин централизованного контроля, которые могут выполнять самостоятельные функции, а также осуществлять множественный контроль в составе АСУ ТП, включающих управляющие вычислительные машины. К числу подобных машин относятся «Пуск», М-4, М-5, М-40, М-60 и др. У машины М-4 число контролируемых температурных точек достигает 240 при максимальной скорости опроса 5 точек/с.

Следующим шагом на пути развития информационных систем явилось включение в их структуру вычислительных машин, что расширило их функциональные возможности. Следует отметить, что использование вычислительных машин существенно повышает стоимость системы управления и может быть экономически оправданным начиная с определенной мощности и производительности технологических объектов, на которых полученное благодаря внедрению ЭВМ повышение эффективности и надежности работы объекта компенсирует дополнительные затраты на систему управления.

В существующих информационно-вычислительных системах с помощью ЭВМ производится расчет технико-экономических показателей работы объекта, осуществляется контроль нахождения параметров в заданных пределах, ведется по определенным алгоритмам обработка измерительной информации с целью диагностики технических ситуаций, анализа состояния объекта и его элементов, производится регистрация аварийных ситуаций.

На рис. 18.1 последовательность преобразования и представления ин-

формации с использованием ЭВМ изображает структура V. Группа коммутаторов осуществляет последовательное подключение к аналого-цифровому преобразователю АЦП выходов первичных ПП и нормирующих НП преобразователей. Сигналы в цифровой форме вводятся в ЭВМ. Результаты расчета технико-экономических показателей, анализа состояния объекта и его элементов выводятся на цифropечать; их отклонения, равно как и отклонения измеряемых величин, сигнализируются. Новой формой представления информации является использование электронно-лучевых индикаторов ЭЛИ, представляющих алфавитно-цифровые дисплей и мнемоскопы. На их экраны выводится буквенно-цифровая и графическая информация, могут выцвечиваться статические изображения фрагментов мнемосхем, на которые накладывается информация о значениях измеряемых параметров.

Использование для преобразования и представления информации структуры V не исключает применения в информационных подсистемах индивидуального и централизованного контроля. Благодаря их сочетанию достигается высокая надежность работы информационно-измерительной подсистемы.

В представленных на рис. 18.1 структурах рассмотрено преобразование аналоговой измерительной информации. Помимо нее большое место занимает дискретная и аналоговая информация, дающая оператору сведения о положении запорных и регулирующих органов, включении и выключении механизмов, необходимая для ведения технологического процесса, но выходящая за рамки данного курса. Реальные системы, соответствующие структурам IV, V, включают значительное число элементов, связанных с синхронизацией и управлением работой элементов, организацией ввода и вывода информации из ЭВМ.

Анализ представленных на рис. 18.1 структур показывает, что первые три включают рассмотренные в предшествующих главах первичные и вторичные приборы. Структуры IV, V помимо первичных и нормирующих преобразователей, многошкальных потенциометров, рассмотренных выше, включают в себя коммутирующие уст-

ройства, аналого-цифровые преобразователи и вычислительную машину, средства представления цифровой информации: дисплеи, цифровые индикаторы, цифропечатающие устройства. Рассмотрим кратко характеристики этих элементов, влияющие на качество преобразования, передачи и представления информации.

В информационных подсистемах используются контактные и бесконтактные коммутаторы аналоговых сигналов. Первые, являясь идеальными переключателями, не создают погрешностей при коммутации, однако обладают низким быстродействием. Бесконтактные коммутаторы, выполняемые на полупроводниковых элементах, обладают высоким быстродействием, но служат источниками дополнительных погрешностей. В устройствах связи с объектом управляющих и информационных вычислительных машин используются коммутирующие устройства обоих типов [30].

Контактные переключатели используются для коммутации цепей термометров сопротивления и термоэлектрических термометров, имеющих уровни сигналов до 100 мВ. Цепи с сигналами более высокого уровня коммутируются бесконтактными переключателями. Для использования последних в цепях термометров к их выходу подключаются нормирующие преобразователи. Остальные первичные приборы используются с унифицированным выходным сигналом по току. Бесконтактные коммутаторы высокого уровня имеют погрешность коммутации не более 0,1—0,2% и частоту  $10^4$ — $10^6$  точек/с.

Для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Погрешность преобразования АЦП, работающих в составе устройств связи ЭВМ с объектом комплекса АСВТ-М, составляет 0,2—0,5%. Скорость кодирования АЦП находится в пределах  $10^4$ — $10^5$  преобразований в секунду. В настоящее время АСУ ТП энергоблоков, предприятий металлургической и химической промышленности используют машины серии М-40; М-60; М-6000; М-7000, входящие в агрегатную систему средств вычислительной техники АСВТ-М. Машины М-40 и М-60 используются на низшем

уровне, осуществляя сбор, обработку и представление информации. Машины производят преобразование сигналов низкого и высокого уровней. Скорость опроса составляет 1000 сигналов в секунду, точность преобразования 0,4—1%. Информационные машины могут работать в управляющем режиме, связываясь с машинами М-6000 и М-7000 [31].

Странами СЭВ разработана и выпускается система вычислительных машин СМ ЭВМ, предназначенная для использования в системах управления технологическими процессами, при автоматизированном проектировании в научных исследованиях. СМ ЭВМ в сочетании с машинами общего назначения ЕС ЭВМ служат технической основой систем обработки информации и управления на всех уровнях управления народным хозяйством. Погрешность выполнения машинами вычислительных операций, осуществляемых с 16-разрядными двоичными словами, зависит от алгоритма вычислений и обычно бывает пренебрежимо малой по сравнению с погрешностями остальных элементов измерительных каналов.

Для представления цифровой информации используются алфавитно-цифровые печатающие устройства, цифровые индикаторы и дисплеи. Скорость печати ротационных печатающих устройств достигает 400 строк в минуту при 128 знаках в строке. Цифровая индикация осуществляется с помощью электромеханических таблиц и индикаторов, использующих газоразрядные лампы и электролюминесцентные сегменты.

Электронно-лучевой индикатор ЭЛИ представляет собой дисплей, на экране которого информация может представляться в виде таблиц, графиков, фрагментов мнемосхем. Преимуществом ЭЛИ по сравнению с другими средствами представления информации является возможность ее концентрации в сочетании с наглядностью. Так, алфавитно-цифровые ЭЛИ в зависимости от размера экрана могут представлять от 500 до 2200 знаков. Вызов на дисплей информации из ЭВМ осуществляется клавиатурой, которая может быть использована оператором также для ввода в машину данных. Работа с ЭЛИ требует значительных объемов памяти и машинного вре-

мени, поэтому они используются с большими ЭВМ.

Одной из наиболее рациональных форм представления информации с использованием дисплея является вызов на экран фрагментов мнемосхемы объекта с наложенной на нее цифровой информацией о значениях параметров. Мнемосхема представляет собой статическое схематичное изображение функциональной схемы технологического объекта или его отдельных частей. Динамическая информация, накладываемая на соответствующие точки мнемосхемы, хранится в буферном запоминающем устройстве БЗУ вычислительной машины. По команде с клавиатуры дисплея вызывается определенный фрагмент мнемосхемы и из БЗУ выводится соответствующая информация.

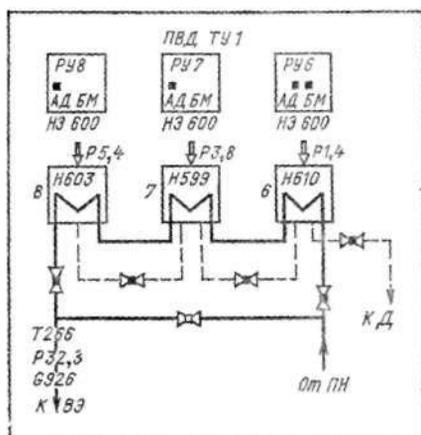


Рис. 18.2. Мнемосхема подогревателей высокого давления

В качестве примера на рис. 18.2 представлен один из наиболее простых фрагментов мнемосхемы энергоблока — мнемосхема подогревателей высокого давления ПВД блока 300 МВт с турбиной К-300/240. От питательных насосов ПИ вода последовательно проходит через ПВД6—ПВД8 и направляется в экономайзер ВЭ котла. Подогрев воды осуществляется паром из отборов турбины. Конденсат греющего пара самотеком стекает из ПВД 8 в ПВД 7 и затем в ПВД 6, откуда направляется в деаэратор Д.

В подогревателях регулируется уровень конденсата, его заданное значение составляет 600 мм. Поддержание уровня может осуществляться автоматическими регуляторами или оператором. Если уровень в одном из ПВД достигает аварийного значения, то вся группа ПВД отключается, чтобы предупредить выброс воды в турбину.

В верхней части мнемосхемы показаны три регулятора уровня ПУ6—ПУ8. Светящиеся

над буквами АД квадраты показывают, как регулируется уровень — автоматически или дистанционно оператором. Квадраты над буквами БМ выцветают, если уровень в ПВД выходит из зоны допустимых значений в ту или другую сторону. Под условным изображением регуляторов указано заданное значение уровня НЗ. В центре мнемосхемы изображены подогреватели ПВД. Незачерненными стрелками показан подвод пара, рядом с ним дается динамическая информация о давлении пара в отборах р, МПа.

Внутри условного обозначения ПВД показано текущее значение уровня Н. В нижней части мнемосхемы оператору дается информация о расходе G и параметрах питательной воды: температуре T и давлении P на выходе регенеративных подогревателей. Мнемосхема включает изображение шести задвижек, светящийся квадрат в центре их условного обозначения говорит о том, что задвижка открыта.

Таким образом, с помощью мнемосхемы оператор получает информацию о значении девяти параметров, положении шести задвижек и работе трех регуляторов.

Представление цифровой информации с помощью цифropечатающих устройств, цифровых табло и ЭЛИ не вносит в нее погрешностей. Ошибки в представлении информации, обусловленные сбоями в работе перечисленных устройств, в данном случае не рассматриваются.

## 18.2. Функции информационно-измерительной подсистемы АСУ ТП и анализ качества их реализации

Проведенный анализ структуры информационной подсистемы и входящих в ее состав элементов позволяет более подробно, чем в § 18.1, остановиться на ее функциях и методах оценки качества их выполнения. Последние основываются на учете характеристик всех элементов, входящих в измерительные каналы, включая трубные и проводные линии связи. Ниже рассматриваются методы оценки погрешностей информационной подсистемы. Надежные и другие показатели ее работы не анализируются.

**Индивидуальный контроль.** Как отмечалось выше, наличие на щите управления индивидуальных средств контроля за наиболее ответственными параметрами позволяет оператору с минимальными затратами времени получить информацию об их значении и тенденциях изменения во времени, если вторичные приборы являются самопишущими. Во многих случаях средства индивидуального контроля используются для расчета по их суточным диаграммам технико-экономических

показателей работы технологического оборудования. При применении индивидуальных средств контроля имеет место максимальная точность и надежность измерения, поскольку измерительный канал включает минимальное число преобразующих элементов: первичный прибор или преобразователь, линии связи, вторичный прибор. В § 2.6 рассмотрены две методики расчета погрешностей таких каналов: первая основывается на использовании предельных основных и дополнительных погрешностей средств измерения, вторая опирается на знание систематических и случайных составляющих погрешностей средств измерения и их связи с такими влияющими величинами, как температура, напряжение питания, продолжительность работы.

Первая методика, базирующаяся на геометрическом суммировании предельных значений погрешностей (2.21) элементов, входящих в измерительный канал, является более простой и чаще применяемой. Для подавляющего большинства практических задач полученные с ее использованием оценки погрешности измерительного канала являются удовлетворительными.

Иначе обстоит дело, если эта погрешность определяется при расчете эффективности работы оборудования. Формула (2.21) не обеспечивает требуемой точности расчета, поскольку приводимые в технической документации предельные значения допустимых погрешностей даются с запасом — они включают случайные и систематические погрешности. Последние у элементов измерительного канала могут иметь различные знаки. При этом не исключается возможность возникновения в измерительном канале результирующей погрешности, превышающей расчетное значение. Основным источником таких отклонений является коррелированность погрешностей средств измерения одного канала, обусловленных отклонениями общей для них влияющей величины.

Вторая методика позволяет в принципе получить научно обоснованные оценки погрешностей измерительных каналов в конкретных условиях эксплуатации. Однако для ее использования, с одной стороны, требуется знание условий работы каждого элемента по всем влияющим величинам (корреляционных и взаимнокорреляционных

функций), с другой, необходимо располагать для каждого элемента уравнениями регрессии, связывающими систематические и случайные погрешности с измеряемой и влияющими величинами.

В подавляющем большинстве случаев контролируемые изменения технологических параметров являются низкочастотными, в связи с чем инерционность средств измерения не вызывает появления дополнительных динамических погрешностей.

Контроль значений теплотехнических параметров в нескольких точках с помощью многоточечных вторичных приборов или одноточечного вторичного прибора с переключателем, соответствующим структуре III рис. 18.1, занимает промежуточное положение между индивидуальным и множественным контролем, реализуемым в СЦК и информационно-вычислительных подсистемах. Обычно он используется для измерения и регистрации параметров, значение которых возрастает в переходных режимах, при пуске или остановке оборудования. На энергоблоках многоточечные регистрирующие приборы используются для записи изменения температуры поверхностей нагрева котлов, трубопроводов, корпуса турбины и пр.

При применении многоточечных самопишущих вторичных приборов осуществляется последовательная точечная регистрация значений нескольких величин. Наличие контактных переключателей приводит к существенному снижению надежности вторичных приборов, тогда как погрешность измерения в принципе не отличается от погрешности индивидуального контроля.

При введении в первичные и вторичные приборы дополнительных контактных устройств они могут использоваться для сигнализации предельных отклонений теплотехнических величин. Погрешность сигнализации несколько превышает погрешность измерения параметра, поскольку к последней добавляется погрешность установки контактного устройства.

**Системы централизованного контроля.** В системах централизованного контроля различных технологических объектов преобразование аналоговых сигналов в цифровой код расширяет возможности системы с точки зрения

форм отображения, регистрации цифровой информации и ее обработки. Хотя, как было отмечено выше, цифровые индикаторы и регистраторы не создают погрешностей, нормирующие преобразователи, коммутаторы аналоговых сигналов и аналогоцифровые преобразователи такие погрешности вносят.

Произведем для сопоставления упрощенный расчет погрешностей комплекта индивидуального контроля и канала СЦК. Первый включает в себя первичный измерительный прибор с предельной погрешностью  $\pm 1\%$  и вторичный прибор с погрешностью  $0,5\%$ . Без учета погрешностей, вносимых проводными линиями связи, предельная погрешность комплекта, рассчитанная по формуле (2.20), составляет  $1,2\%$ . Измерительный канал СЦК включает, кроме первичного прибора, нормирующий преобразователь с погрешностью  $\pm 0,5\%$ , коммутатор с погрешностью  $\pm 0,1\%$  и АЦП с погрешностью  $\pm 0,5\%$ . Результирующая погрешность измерительного канала систем контроля составляет  $\pm 1,23\%$ . Небольшое различие результирующих погрешностей каналов индивидуального контроля и СЦК определяется доминирующей погрешностью первичного прибора. При ее снижении до  $\pm 0,5\%$  влияние погрешностей дополнительных элементов возрастает: в первом случае эта погрешность составляет  $0,71\%$ , а во втором  $0,87\%$ . Введение в измерительный канал дополнительных элементов в большей мере влияет на его надежность. В связи с этим становится очевидной важность использования первичных преобразователей с унифицированным выходным сигналом.

**Информационно-вычислительные системы (ИВС).** Одной из основных функций этой системы в отличие от предыдущих является расчет технико-экономических показателей (ТЭП) работы технологического оборудования, выполняемый в темпе с ходом технологического процесса. Диагностика состояния оборудования является вторым важным и развивающимся направлением использования ИВС. Так, в АСУ ТП энергоблоков выполняются расчеты состояния проточной части турбины, отложений на парогенерирующих поверхностях нагрева котла и теплообменных трубках кон-

денсатора и др. Наличие этой информации позволяет наметить оптимальные сроки промывок оборудования и его ремонта, предотвращает возникновение на объекте аварийных ситуаций, чреватых большими материальными потерями.

Учитывая сложность технологического оборудования, ИВС позволяет быстро произвести анализ возникшего аварийного состояния на объекте и выдать оператору рекомендации по его устранению. Регистрация аварийных ситуаций помогает установить объективные причины аварий, определить правильность работы систем защит и действий оперативного персонала.

Расчет на ИВС технико-экономических показателей теплотехнических объектов имеет ряд общих моментов, которые рассматриваются на примере расчета КПД котла брутто  $\eta_k^{бр}$ , %, по прямому балансу в соответствии с руководящими материалами по расчету экономичности работы ТЭС:

$$\eta_k^{бр} = (Q_k^{бр} \cdot 10^3) / (B_k \cdot 2,931), \quad (18.1)$$

где  $Q_k^{бр}$  — теплопроизводительность котла, ГДж/ч;  $B_k$  — количество сожженного условного топлива, т условного топлива/ч.

Теплопроизводительность котла

$$Q_k^{бр} = D_{пе} (i_{пе} - t_{п.в}) + D_{пп} (i''_{пп} - i'_{пп}) + Q_k^{от} + Q_{раст} + Q_{проч}, \quad (18.2)$$

где  $D_{пе}$ ,  $D_{пп}$  — расходы соответственно перегретого и вторичного пара, т/ч;  $i_{пе}$ ,  $t_{п.в}$ ,  $i''_{пп}$ ,  $i'_{пп}$  — соответственно энтальпии перегретого пара, питательной воды, вторичного пара на входе и выходе из котла, ГДж/т;  $Q_k^{от}$  — количество теплоты, отданной на собственные нужды;  $Q_{раст}$ ,  $Q_{проч}$  — количество теплоты, отданной при растопке, и прочие расходы, определяемые по нормативным данным.

При работе котла на газе его расход  $B_n$  измеряется с помощью сужающих устройств и пересчитывается в расход условного топлива по теплоте сгорания  $q_n$ , определяемой в месте измерения расхода по формуле

$$B_n = B_n (q_n / q_{ут}),$$

где  $q_{ут} = 29,31$  кДж/кг = 0,02931 ГДж/т.

В выражении (18.2) расходы перегретого и вторичного пара, расход газа измеряются по перепаду давления на сужающих устройствах. Для опреде-

ления  $D_{пе}$ ,  $D_{шт}$  и  $B_{н}$  используется уравнение расхода для сжимаемых сред (12.5) с учетом фактической плотности при температурах  $t_{пе}$ ,  $t_{пн}$ ,  $t_{ггаз}$  и давлениях  $p_{пе}$ ,  $p_{пн}$ ,  $d'_{пн}$ ,  $p_{газ}$ .

Для расчета фактической плотности используется уравнение состояния идеального газа с разложением в ряд по  $p$  и  $t$ . Поскольку введение в память машины термодинамических таблиц требует большого объема памяти, расчет энтальпий производится в функции давления и температуры для соответствующих сред по приближенным формулам. Эти расчеты являются характерными для теплотехнических объектов, и разработаны стандартные программы расчета плотностей сжимаемых сред и энтальпий в зависимости от вида среды, давления и температуры.

Расчет КПД котла по выражениям (18.1), (18.2) с использованием мгновенных значений входящих в них параметров лишен смысла, поскольку между теплотой, вводимой с топливом и выводимой с первичным и вторичным паром, существует временной сдвиг, зависящий от динамических свойств объекта и его тепловой инерции. Вследствие этого производится усреднение контролируемых параметров, которые входят в расчетные формулы оценки ТЭП. Этот момент является общим для всех технологических объектов. Минимальное время усреднения, для которого производится расчет технико-экономических показателей, зависит от свойств объекта и характеристик системы управления. У энергоблоков ТЭС расчет ТЭП производится для интервалов времени 15 мин, 1; 8 и 24 ч. Первые два интервала используются для оперативного управления, 8-часовой — для характеристики работы смены, а суточный — для составления отчетной документации.

Технико-экономические показатели работы объектов и другие расчетные величины подобно  $\eta_{к}^{ср}$  являются косвенными, погрешность их определения зависит от погрешностей измерения исходных теплотехнических величин и расчетных соотношений между ними. Изложенные в § 2.4 методы оценки погрешностей косвенных измерений позволяют произвести оценку погрешности расчета ТЭП при заданных погрешностях измерительных каналов.

Частные производные экономического показателя по измеряемым теплотехническим величинам, в частности для рассматриваемого примера  $\partial \eta_{к}^{ср} / \partial B_{н}$ ,  $\partial \eta_{к}^{ср} / \partial q_{н}$ ,  $\partial \eta_{к}^{ср} / \partial D_{шт}$ ,  $\partial \eta_{к}^{ср} / \partial D_{пе}$  и пр. являются весовыми коэффициентами, определяющими влияние той или иной величины и погрешности ее измерения на расчетный экономический показатель и его погрешность. Анализ приведенных выше соотношений для  $\eta_{к}^{ср}$  показывает, что на погрешность его расчета определяющее влияние оказывает погрешность измерения расхода топлива и его теплотворной способности, расходов пара, затем его температуры, давления и т. д. Доминирующее влияние погрешности измерения расходов является характерным при расчете экономических показателей тепловых объектов.

При расчете погрешностей измерительных каналов учитываются погрешности сужающих устройств, первичных приборов и преобразователей, нормирующих преобразователей, коммутаторов, аналого-цифровых преобразователей, трубных и проводных линий связи, если последние могут служить источниками погрешностей. Методы расчета результирующих погрешностей каналов рассмотрены выше, значения погрешностей различных средств измерения приведены в главах, посвященных рассмотрению соответствующих методов измерения теплотехнических величин и средств измерения. Результирующая погрешность определения ТЭП рассчитывается по формулам оценки погрешности результатов косвенных измерений (2.29), (2.30).

Алгоритмы диагностики состояния объекта и расчета технико-экономических показателей работы оборудования используют большой объем первичной информации. Для исключения ошибок из-за отказов измерительных каналов расчетным операциям обычно предшествует проверка по специальным программам достоверности информации, использующая связь между технологическими параметрами объекта.

### 18.3. Принципы построения функциональных схем теплотехнического контроля

Проектирование любого теплового объекта сопровождается разработкой принципиальных схем теплотехнического контроля и автомати-

ческого регулирования, которые являются техническим документом, определяющим структуру АСУ ТП, объем и разновидность технических средств, используемых для ее реализации.

Принципиальная схема теплотехнического контроля содержит функциональную схему технологического объекта с указанием мест отбора сигналов, размещения измерительных

ектирования с использованием ЭВМ и графопостроителей.

Исполнение принципиальных схем в настоящее время осуществляется в двух вариантах: в соответствии с ГОСТ 3925-59 и ОСТ 36-27-77. Поскольку условные обозначения устройств в этих стандартах различаются, ниже рассматриваются два варианта изображения принципиальных схем теплотехнического контроля од-

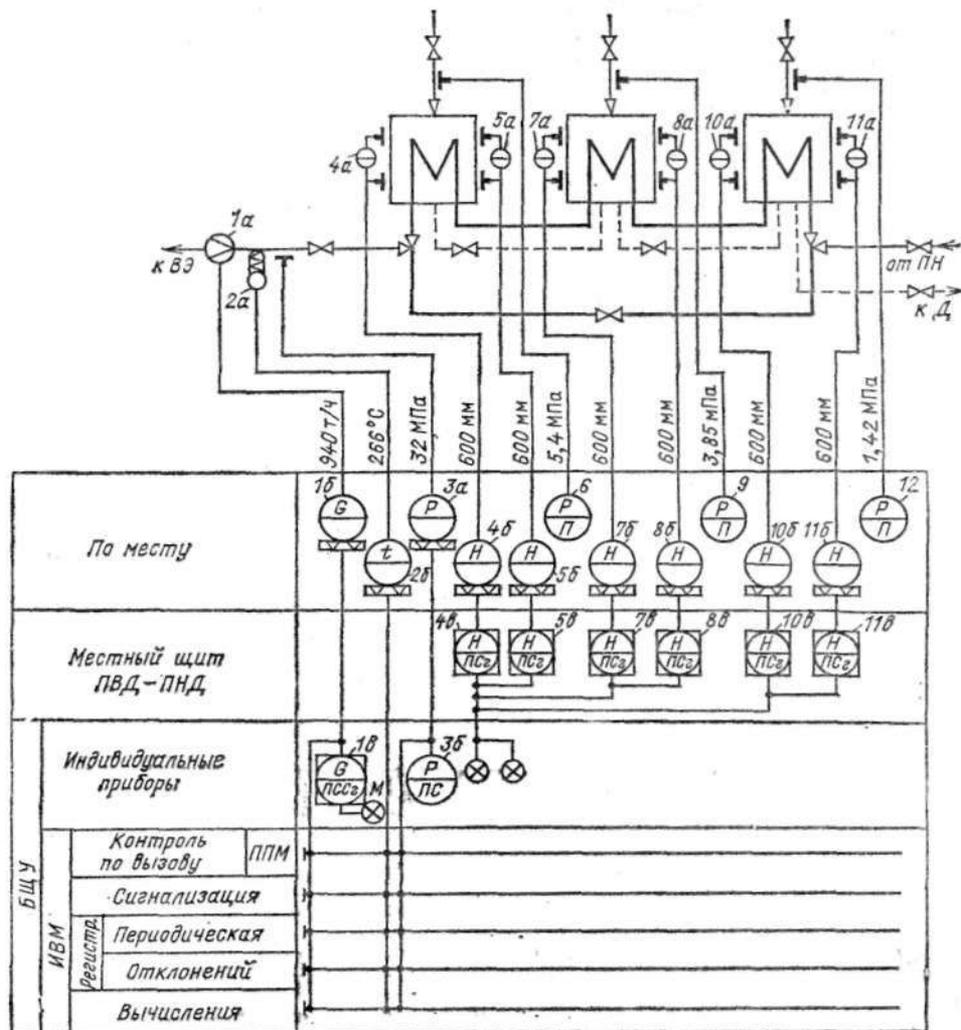


Рис. 18.3. Принципиальная схема теплотехнического контроля ПВД, выполненная в соответствии с ГОСТ 3925-59

приборов и выполняемых ими функций. Прилагаемая к принципиальным схемам спецификация, содержащая в соответствии с позициями схем развернутые характеристики используемых средств контроля и регулирования, служит основой для составления заявочных ведомостей на приборы. С учетом большого объема используемых технических средств процесс проектирования АСУ ТП является трудоемким. Он сопровождается переработкой больших массивов технической документации и выполнением значительного объема графических работ. Вследствие этого интенсивно ведутся работы по автоматизации процесса про-

ного и того же объекта — подогревателей высокого давления (ПВД), обогреваемых паром отборов турбины.

Принцип действия регенеративных ПВД рассмотрен в § 18.2 при анализе вызываемой на дисплей мнемосхемы, представленной на рис. 18.2. На рис. 18.3, 18.4 изображены схемы теплотехнического контроля, основанные на использовании традиционных средств представления информации: вторичных показывающих и регистрирующих приборов, многошкального потенциометра ППМ. При аварийных отклонениях уровня система защиты ПВД производит их байпасирование. Для снижения вероятности

ложного срабатывания защиты контакты вторичных приборов соединяются последовательно, благодаря чему защита срабатывает только при отклонении показаний обоих уровнемеров по любому из ПВД. Представленный на рис. 18.3, 18.4 объем средств теплотехнического контроля обеспечивает управление работой ПВД и контроль за их состоянием.

значаются окружностью. По ГОСТ 3925-59 первичные преобразователи, вводимые в объекты: контактные термометры, сужающие устройства, преобразователи индукционных и тахометрических расходомеров — имеют свои условные обозначения, тогда как по ОСТ 36-27-77 они также обозначаются окружностями, не разделенными чертой, как и все пер-

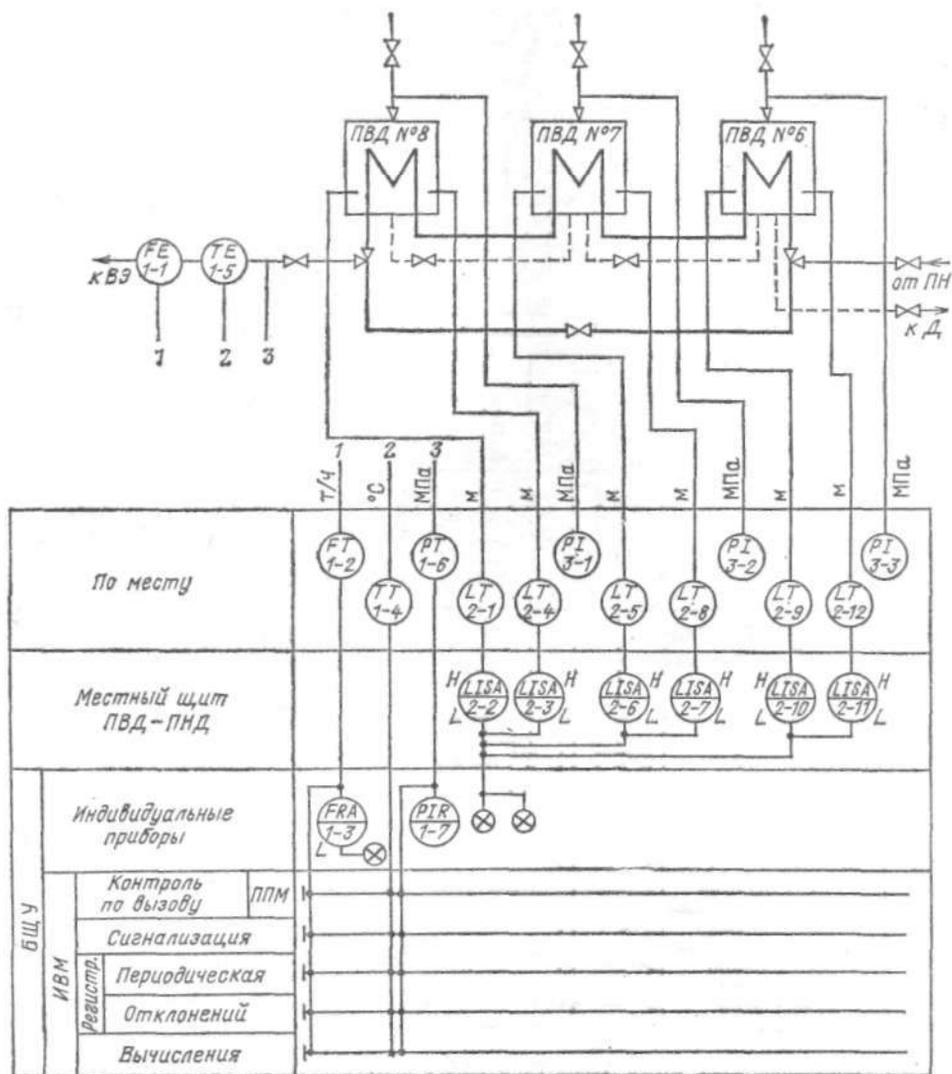


Рис. 18.4. Принципиальная схема теплотехнического контроля ПВД, выполненная в соответствии с ОСТ 36-27-77

В нижней части принципиальных схем указано место размещения первичных приборов, нормирующих преобразователей, вторичных приборов. Точками показано использование унифицированного сигнала для контроля по вызову, сигнализации, периодической регистрации, расчета ТЭП, блокировки и защиты. При большом числе линий связи между измерительными приборами и точками отборов обоими стандартами допускается разрыв линий связи, как это показано на рис. 18.4.

По обоим стандартам первичные приборы и преобразователи, вторичные приборы обо-

вичные приборы, устанавливаемые по месту. По первому стандарту в верхней части круга указывается измеряемый параметр, а функции прибора (показания, запись, сигнализация) — под чертой. По второму стандарту верхняя часть круга содержит всю эту информацию, причем первая буква характеризует параметр, вторая его уточняет, а три последующие определяют выполняемые прибором функции, в нижней части круга указывается номер прибора. По первому стандарту номер позиции размещается рядом с условным обозначением прибора.

Таблица 18.1. Условные обозначения по ГОСТ 3925-59

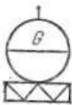
Обозначение	Наименование
	Термометр сопротивления
	Отборное устройство прибора давления, уровня
	Сужающее устройство
	Уравнительный конденсационный сосуд
	Преобразователь расхода ( $t$ — температуры, $p$ — давления, $H$ — уровня) в электрический сигнал
	Показывающий манометр
	Прибор, измеряющий расход: показывающий, самопишущий и сигнализирующий

Таблица 18.2. Условные обозначения по ОСТ 36-27-77

Обозначение	Наименование
	Первичный преобразователь расхода (сужающее устройство)
	Установленный по месту передающий преобразователь расхода в электрический сигнал
	Установленный на щите прибор для измерения расхода, самопишущий, сигнализирующий
	Первичный преобразователь температур (термометр сопротивления)
	Передающий преобразователь температуры, установленный на щите
	Установленный по месту показывающий манометр
	Установленный на щите показывающий, сигнализирующий уровень, входящий в систему защиты

В соответствии с ГОСТ 3925-59 и ОСТ 36-27-777 в табл. 18.1 и 18.2 приведены некоторые условные обозначения устройств теплотехнического контроля, необходимые для прочтения принципиальных схем теплотехнического контроля ПВД, приведенных на рис. 18.3 и 18.4. Сопоставление этих схем позволяет установить разницу в принципах изображения схем технологического контроля и общие моменты, связанные с их построением. Следует отметить, что для изображения принципиальных схем теплотехнического контроля простых объектов может быть использовано другое начертание схем, когда условные изображения измерительных приборов наносятся на функциональную схему, а не на отдельные поля, как на рис. 18.3, 18.4.

#### 18.4. Измерительные системы теплотехнических исследований

Большинство тепловых объектов, таких как котлы, реакторы, турбины, парогенераторы и пр., являются сложными многоэлементными агрегатами, расчет статических и динамических характеристик которых при конструировании осуществляется по приближенным физико-математическим моделям, не учитывающим всей совокупности влияющих величин, действующих

в реальных условиях, и всех связей, существующих внутри объекта. В силу этих причин введению в эксплуатацию таких устройств предшествуют стендовые или промышленные испытания, ставящие своей целью определение оптимальных режимов работы оборудования с учетом действующих ограничений со стороны условий и режимов работы их элементов, продиктованных надежностью и безопасностью функционирования.

Вопросам экспериментального исследования характеристик технологических объектов уделяется большое внимание, обусловленное сложностью проведения таких исследований, их большой трудоемкостью и стоимостью. Учитывая значительное число влияющих факторов и ограничений, планирование таких испытаний представляет самостоятельную оптимизационную задачу, являющуюся предметом изучения бурно развивающейся научной дисциплины «Теории экспериментальных исследований».

Процесс экспериментального исследования характеристик объекта можно представить в виде структурной схемы, изображенной на рис. 18.5. На вход технологического объекта поступают измеряемые и неизмеряемые величины  $X_i$ , регулируемые  $X_1, X_2$  и нерегулируемые  $X_3, X_4$ . Так, расход воды, воздуха, газообразного и жидкого топлива на котлах является измеряемой и регулируемой величиной, тогда как качество топлива (его влажность, теплотворная способность) подлежит только периодическому лабораторному контролю. Совокупность  $Y_j$  образует множество выходных величин, характеризующих качество и количество произведенной объектом продукции. Такими величинами у котлов являются расход пара и его параметры: температура, давление, солесодержание и

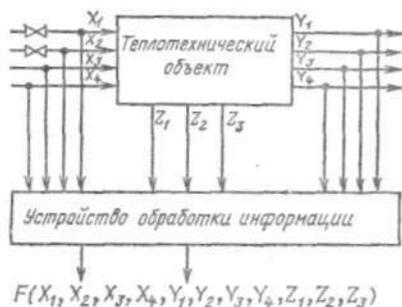


Рис. 18.5. Структурная схема системы теплотехнических исследований

пр. Величины  $Z_u$  представляют собой контролируемые в промежуточных или конечных точках объекта параметры, влияющие на экономичность процесса или надежность работы элементов. К числу таких параметров у котлов относятся содержание кислорода в уходящих газах и температура последних, температура пара в промежуточной точке пароперегревателя и др.

Полученная в результате обработки данных целевая функция  $F(X_1, X_2, X_3, X_4, Z_1, Z_2, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$  представляет собой записанные в аналитической или графической форме соотношения между заданными нерегулируемыми  $X_3, X_4$  и регулируемыми  $X_1, X_2$  входными и выходными  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  величинами и связанными с ними  $Z_1, Z_2, Z_3$ . В процессе испытаний могут определяться целевые функции отдельных элементов  $f(X_i, Z_u, Y_j)$ , которые зависят от перечисленных выше величин. Целе-

вые функции объекта и его элементов служат основой для разработки алгоритмов управления объектом и диагностики состояния его элементов.

Процессу проведения испытаний предшествует изучение объекта и его математической модели, основанной на физико-химических соотношениях, лежащих в основе протекающих в нем технологических процессов. Это изучение завершается определением круга измеряемых параметров, точек их наиболее представительного контроля, выбором средств измерения с учетом необходимой точности измерения конкретной величины. При промышленных испытаниях в основном используются эксплуатационные приборы, и только для измерения основных параметров применяются специальные приборы, имеющие повышенную точность и индивидуальную градуировку. В ряде случаев организуется дополнительный контроль параметров, которые в эксплуатационных условиях не измеряются. Так, при проведении балансовых испытаний котла с целью определения КПД брутто по прямому балансу (18.1), (18.2) для измерения разности давлений на сужающих устройствах используются переносные дифференциальные манометры, специальными термоэлектрическими термометрами производится измерение температуры перегретого и вторичного пара. При исследовании режимов топочного процесса с помощью оптических пирометров или специальных термоэлектрических термометров измеряются температуры в топке, которые в эксплуатационных условиях не контролируются.

Для большинства тепловых объектов характерны низкие скорости протекания технологических процессов, поэтому при определении статических характеристик объектов инерционность средств измерения не оказывает влияния на результаты измерения. При испытаниях газовых турбин, двигателей вопросы согласования динамических характеристик средств измерения и синхронизации многопараметрической регистрации являются одними из основных. В значительной мере это распространяется на испытания технологических объектов, ставящих своей целью определение динамических характеристик, необходимых для разработки алгоритмов автоматического регулирования. Поскольку вопросы

исследования динамических характеристик объектов подробно рассматриваются в курсе автоматического регулирования в данной работе они опущены.

Одним из существенных моментов промышленных испытаний является наличие высокого уровня помех, обусловленных пульсацией контролируемых и неконтролируемых величин. При случайном характере их изменения использование методов статистической обработки приводит к снижению влияния помех.

Для большинства задач теплотехнических исследований известны математические соотношения, вытекающие из физической сущности процесса и связывающие зависимые и независимые переменные. При этом задача исследований сводится к нахождению оценок коэффициентов преобразования, зависящих от конкретных режимов работы оборудования, вида топлива, сырья, т. е. факторов, трудно учитываемых при проектировании оборудования. Определение коэффициентов известного математического соотношения по экспериментальным данным производится с использованием метода наименьших квадратов, обеспечивающего при нахождении коэффициентов минимума суммы квадратов отклонения расчетной зависимости от экспериментальных точек.

Испытания, ставящие своей целью определение коэффициентов известной функции, относятся к числу совместных либо совокупных измерений; последние от первых отличаются тем, что вид функции, связывающей переменные, меняется в зависимости от значения независимых переменных:

$$\left. \begin{aligned} F_1(X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n}, Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1l}) \\ Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1m} = 0; \\ F_2(X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n}, Z_{21}, Z_{22}, \dots, Z_{2l}) \\ Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2m} = 0; \\ \dots \\ F_r(X_{r1}, X_{r2}, \dots, X_{rn}, Z_{r1}, Z_{r2}, \dots, Z_{rl}) \\ Y_{r1}, Y_{r2}, \dots, Y_{rm} = 0. \end{aligned} \right\} (18.3)$$

Поскольку погрешность средств измерения обычно мала по сравнению с измеряемой величиной, для оценки влияния погрешностей на определяемую величину производится разложение функции (18.3) в ряд Тейлора в

окрестностях средних значений переменных  $X_i^0, Z_u^0, Y_j^0$ . При переходе к приращениям (погрешностям) система уравнений (18.3) принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F_1}{\partial X_i} \right) \Delta X_i + \sum_{u=1}^l \left( \frac{\partial F_1}{\partial Z_u} \right) \times \\ \times \Delta Z_u + \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial F_1}{\partial Y_j} \right) \Delta Y_j = 0; \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F_r}{\partial X_i} \right) \Delta X_i + \sum_{u=1}^l \left( \frac{\partial F_r}{\partial Z_u} \right) \times \\ \times \Delta Z_u + \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial F_r}{\partial Y_j} \right) \Delta Y_j = 0. \end{aligned} \right\} (18.4)$$

С использованием системы уравнений (18.4) могут быть решены задачи определения погрешности  $\Delta Y_j$  при известных погрешностях измерения  $\Delta X_i$  и  $\Delta Z_u$  и обратные задачи, решаемые при выборе средств измерения, расчета  $\Delta X_i$  и  $\Delta Z_u$  при заданных  $\Delta Y_j$ . Если вид функциональной зависимости не меняется и задача сводится к определению одной зависимой переменной, то осуществляется переход к более простому случаю — косвенным измерениям, методы оценки погрешностей которых рассмотрены выше.

В ряде случаев из-за большого числа влияющих величин, многообразия и сложности протекающих процессов априорная математическая модель, связывающая зависимые и независимые величины, отсутствует. В результате экспериментального исследования определяются простейшие эмпирические соотношения между величинами (уравнения регрессии), отражающие количественную сторону процесса, но не вскрывающие их физической сущности. Так, если на целевую функцию оказывают влияние  $n$  изменяемых величин  $X_i$ , то простейшее уравнение регрессии имеет вид

$$F(X_1, \dots, X_n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{j < i}^n a_{ji} X_j X_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} X_i^2. \quad (18.5)$$

Одно из направлений теории экспериментальных исследований посвящено разработке оптимальных планов,

обеспечивающих определение зависимости (18.5) при проведении минимального числа опытов с варьированием переменных  $X_i$ . При обработке экспериментальных данных рассчитываются оценки коэффициентов уравнения регрессии  $a_i, a_{ji}, a_{ii}$ , проверяется уровень их значимости и производится проверка адекватности модели полученным результатам исследования. Влияние погрешности измерения переменных  $X_i$  на коэффициенты уравнения регрессии может быть определено с помощью методов расчета погрешностей косвенных измерений, рассмотренных выше.

Результаты экспериментального исследования, как и эффективность систем управления технологическими

процессами, в значительной мере зависят от полноты и достоверности первичной информации. Применение средств измерения с унифицированным выходным сигналом позволяет осуществить наиболее рациональное построение информационно-измерительных систем. Значение первых особенно возрастает при многократном использовании унифицированного сигнала первичных преобразователей в различных подсистемах АСУ ТП, что ведет к сокращению числа используемых приборов и снижению эксплуатационных расходов. Естественно, что при этом резко повышаются требования к надежности и метрологическим характеристикам приборов, а также к условиям и качеству их эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. 3-е изд. — М.: Энергия, 1978. — 702 с.
2. Венцель Е. С. Теория вероятностей. 4-е изд. — М.: Наука, 1969. — 572 с.
3. Электрические измерения неэлектрических величин. 5-е изд./А. М. Турчин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.
4. Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. — М.: Энергия, 1978. — 215 с.
5. Линевег Ф. Измерение температур в технике. Справочник: Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1980. — 544 с.
6. Ярышев Н. П. Теоретические основы измерения нестационарных температур. — Л.: Энергия, 1967. — 299 с.
7. Преображенский В. П., Чистяков В. С. Измерение быстроменяющихся температур газового потока при помощи малоинерционных термодатчиков. — Измерительная техника, 1968, № 5, с. 45—48.
8. Гордов А. Н. Основы пирометрии. — М.: Металлургия, 1971. — 447 с.
9. Лысков Б. В., Прозоров В. К. Реакторная термометрия. — М.: Атомиздат, 1980. — 199 с.
10. Гонек Н. Ф. Манометры. — Л.: Машиностроение, 1979. — 174 с.
11. Монтаж приборов и средств автоматизации/Под ред. А. К. Адабашьяна и др. — М.: Энергия, 1972. — 503 с.
12. Бошняк Л. П. Измерения при теплотехнических исследованиях. — Л.: Машиностроение, 1974. — 447 с.
13. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. — Л.: Машиностроение, 1975. — 775 с.
14. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД-50-2/3-80. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 318 с.
15. Альбом графиков к правилам измерения расхода жидкостей, газов и паров стандартными диафрагмами и соплами. — М.: Изд-во стандартов, 1964. — 148 с.
16. Бобровников Г. Н., Катков А. Г. Методы измерения уровня. — М.: Машиностроение, 1977. — 166 с.
17. Павленко В. А. Газоанализаторы. — Л.: Машиностроение, 1965. — 296 с.
18. Авдеева А. А. Хроматография в энергетике. — М.: Энергия, 1980. — 264 с.
19. Авдеева А. А., Белосельский Б. С., Краснов М. Н. Контроль топлива на электростанциях. — М.: Энергия, 1973. — 384 с.
20. Приборы контроля окружающей среды/Под ред. В. Е. Манойлова. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.
21. Яшин Я. И. Физико-химические основы хроматографического разделения. — М.: Химия, 1976. — 215 с.
22. Джеффери П., Киппинг П. Анализ газов методами газовой хроматографии. — М.: Мир, 1976. — 256 с.
23. Кулаков М. В., Шпатов Е. Ф., Ханберг В. А. Газовые хроматографы. — М.: Энергия, 1968. — 128 с.
24. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей. — М.: Энергия, 1970. — 552 с.
25. Тхоржевский В. П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. — М.: Химия, 1976. — 272 с.
26. Лопатин Б. А. Теоретические основы электрических методов анализа. — М.: Высшая школа, 1976. — 295 с.
27. Химический контроль на тепловых и атомных электростанциях/Под ред. О. И. Мартыновой. — М.: Энергия, 1980. — 320 с.
28. Живилова Л. М., Назаренко П. Н., Маркин Г. П. Автоматический контроль водно-химического режима ТЭС. — М.: Энергия, 1979. — 224 с.
29. Кантере В. М., Казаков А. В., Кулаков М. В. Потенциметрические и титриметрические приборы. — М.: Машиностроение, 1970. — 304 с.
30. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств. — М.: Машиностроение, 1974. — 462 с.
31. Плетнев Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. — М.: Энергоиздат, 1981. — 368 с.

32. Автоматизация крупных тепловых электростанций/Под ред. М. П. Шальмана. — М.: Энергия, 1974. — 240 с.

33. Шальман М. П., Плютинский В. И. Контроль и управление на атомных электростанциях. — М.: Энергия, 1979. — 271 с.

34. Каган Б. М., Волтелев А. И., Лукьянов Л. М. Системы связи УВМ с объектами управления в АСУ ТП. — М.: Советское радио, 1978. — 303 с.

35. Смирнов Н. И., Хитров Б. В., Лютиков

Ю. А. Управляющие и информационные машины, применяемые на электростанциях. — М.: Энергия, 1979. — 271 с.

36. Ключев А. С., Глазов Б. В., Дубровский А. Х. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. — М.: Энергия, 1980. — 512 с.

37. Трембовля В. И., Фигнер Е. Д., Авдеева А. А. Теплотехнические испытания котельных установок. — М.: Энергия, 1977. — 297 с.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

#### Анализаторы:

- колориметрические 200
- кондуктометрические 187
- пламенно-фотометрические 202
- полярнографические 183
- потенциометрические 193
- оптические 200

Аналоговый измерительный прибор 5

### Б

Барометры 98

### В

Вакуумметры 94

Вариация 12

Влияющая физическая величина 12

Водородомеры 205

Время установления показаний 72

### Г

#### Газоанализаторы:

- вольтамперметрические 182
  - кулонометрические 183
  - инфракрасного поглощения 174
  - магнитные 172
  - объемные химические 167
  - оптические 174
  - тепловые 168
  - термокондуктометрические 169
  - термохимические 171
  - ультрафиолетового поглощения 176
  - фотоколориметрические 176
  - хроматографические 177
  - электрические 182
- Градуировочная характеристика 12

### Д

#### Давление:

- абсолютное 94
- вакуумметрическое 94
- избыточное 94

Двухмостовая компенсационная схема 53

Дисперсия 8

Диафрагма:

нестандартная 128

сдвоенная 128

сегментная 129

стандартная 117

#### Дифманометры:

- грузопоршневые 110
- мембранные 106
- сильфонные 105
- колокольные 108

#### Детекторы хроматографов:

- аргоновый ионизационный 181
- пламенно-ионизационный 181
- по теплопроводности 180

Доверительный интервал 9

Дозаторы хроматографические 180

### Ж

Жесткомеры 202

### З

Зонд трубчатый 207

— щелевой 207

### И

#### Измерение температур:

- графитовой кладки 76
- движущих деталей 74
- поверхностей 73
- расплавов пластмасс 79
- солей 79
- стали 79
- стекла 79
- цветных металлов 79
- твэлов 75
- теплоносителя 76

Иономеры 200

### К

#### Кислородомеры:

- амперометрические 204
- кондуктометрические 204
- магнитные 172

Класс точности 73

Колонки разделительные 179

Компенсационный прибор для измерения малых сопротивлений 56

Кондуктометры:  
безэлектродные высокочастотные 191  
— низкочастотные 192  
электродные 189  
Контроль индивидуальный 213  
Коэффициент:  
преобразования 12  
расхода 119, 121  
Кремнемеры 201  
Кривые поляризационные 183

## Л

Логометры 54

## М

Манометры:  
двухтрубные 95  
деформационные 99  
понижающие 113  
мембранные 106  
однотрубные 96  
пьезоэлектрические 111  
сифонные 105  
с тензопреобразователями 111  
тепловые 113  
трубчато-пружинные 101

Математическое ожидание 8

Метод:

двух термометров 75  
излучения-поглощения 74  
обращения спектральных полос 75

Методика использования сужающих устройств 124

Милливольтметры:

измерение термо-ЭДС 37  
устройство 35

## Н

Напоромеры 94

Неуравновешенные листы 52

Нефелометры 202

Нормальный закон распределения 8

## П

Передача дистанционная 81, 84, 90

Пирометры:

квазимонохроматические 59  
оптические 64  
полного излучения 60, 67  
спектрального отношения (цветовые) 61, 67  
фотоэлектрические 66

Погрешность:

абсолютная 7  
дополнительная 12  
метода измерения 7  
основная 12

относительная 7  
приведенная 7  
систематическая 7  
случайная 7  
средства измерения 7

Подсистема информационно-измерительная 209

Порог чувствительности 12

Постоянная времени термометра 72

Потенциометры:

автоматические 41  
с постоянной силой рабочего тока 39

Преобразователь:

дифференциально-трансформаторный 82  
емкостный для измерения уровня 149  
индуктивный для измерения уровня 152  
первичный 81  
передающий 81  
с магнитной компенсацией 86  
ферродинамический 89  
электросиловой 91

## Р

Разделитель мембранный 115

Распределение случайных погрешностей 8

Раствор буферный 119

Расходомеры:

камерные 135  
переменного перепада давлений 117  
постоянного перепада давлений 130  
тахометрические 132  
турбинные 133  
ультразвуковые 137  
шариковые 134  
электромагнитные 135

Ротаметры 130

## С

Сигнализаторы уровня:

жидких металлов 153  
сыпучих тел 159

Система централизованного контроля 219

Системы теплотехнических исследований 219

Сосуды:

конденсационные уравнивательные 127  
разделительные 116  
уравнивательные 143  
— двухкамерные 144  
— комбинированные 145  
— однокамерные 143

Среднее квадратическое отклонение 8

Средства измерения:

вариации 12  
влияющая физическая величина 12  
входной сигнал 12  
выходной сигнал 12  
градуировочная характеристика 12  
дополнительная погрешность 12  
класс точности 13

коэффициент преобразования 12  
нормальные условия применения 12  
образцовые 6  
основная погрешность 12  
порог чувствительности 12  
рабочие 6  
— условия применения 12  
стабильность 12  
структурные схемы 11  
чувствительность 12  
Структура информационно-измерительной подсистемы 210  
Схемы функциональные теплотехнического контроля 216  
Схемы измерения уровня:  
в конденсаторе турбины 146  
в подогревателях 146  
низкокипящих сред 147  
с двухкамерным уравнильным сосудом 144  
с комбинированным уравнильным сосудом 145  
с одномерным уравнильным сосудом 143  
Счетчики:  
количества жидкости 117, 135  
теплоты 140

## Т

Тензопреобразователи 140  
Тепломеры 140  
Термобатарей 26  
Термометры сопротивления:  
влияние магнитных полей 77  
германиевые 46, 48, 78  
градуровки 44, 45, 46  
медные 44, 48  
никелевые 44  
платиновые 45, 48, 77  
подключение двухпроводное 49, 51  
— трехпроводное 49, 51  
— четырехпроводное 49, 56  
угольные 78  
устройство 47, 48  
Термометры термоэлектрические:  
введение поправки градуировки 27—29  
— — дифференциальные 26  
— — кабельные 31—33, 75, 76  
— — на температуру свободных концов 25, 38, 42  
— — правила подключения 25  
— — пределы допускаемых отклонений 29  
— — требования к применяемым материалам 27, 30, 31  
— — устройство 30, 31  
Термометры манометрические:  
газовые 22  
жидкостные 23  
конденсационные 23  
Термометры стеклянные:  
с вложенной шкалой 19  
палочные 19

поправка на выступающий столбик 20  
разновидности 21  
смещение нулевой точки 21  
Точка изопотенциальная 197  
Турбидиметры 202  
Тягомеры 84

## У

Удлиняющие термоэлектродные провода 32  
Уравнение расхода:  
газа, пара 119  
несжимаемой жидкости 119  
Уравновешенные мосты 50  
Уровнемер:  
акустический 156  
буйковый 148  
гидростатический 142  
дифманометрический 142  
емкостный 149  
индуктивный 149  
поплавковый 147  
радиоволновый 154  
с визуальным отсчетом 141  
сыпучих материалов 159  
термокондуктометрический 157  
Устройства сужающие стандартные:  
диафрагмы 117  
коэффициент расхода 119, 121  
методика применения 124  
расчет градуировочной характеристики 118  
сопло 118  
— Вентури 118  
Устройство подготовки пробы 208

Фотокolorиметры 200

## Х

Хроматограмма 178  
Хроматографы:  
лабораторные 181  
промышленные 181

## Ц

Цифровой измерительный прибор 5

## Ч

Чувствительный элемент 81

## Э

Электроды:  
водородный 195  
рабочий стеклянный 195  
сравнения 196