

Т.М. ИВАНОВА,  
Н.Д. КУЗНЕЦОВ,  
В.С. ЧИСТЯКОВ

# ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Учебник для вузов



Г.М. ИВАНОВА,  
Н.Д. КУЗНЕЦОВ,  
В.С. ЧИСТЯКОВ

# ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Учебник для студентов вузов

*Допущено Министерством образования  
и науки Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов вузов,  
обучающихся по направлению подготовки  
«Теплоэнергетика»*

2-е издание, переработанное  
и дополненное



Москва  
Издательство МЭИ  
2005

УДК 621.1  
ББК 31.3  
И 209

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор И.В. Кораблев,  
канд. техн. наук, профессор И.К. Пестрюв

**Иванова Г.М.**  
И 209 Теплотехнические измерения и приборы : учебник для вузов /  
Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чисяков. — 2-е изд., перераб. и доп.  
— М. : Издательство МЭИ, 2005. — 460 с., ил.

ISBN 5-7046-1046-3

Рассмотрены методы и современные средства измерения таких теплотехнических величин как температура, давление, уровень, расход, состав газов и растворов. Анализируются погрешности измерений, способы их оценки и методы снижения, дается сравнительный анализ различных методов и средств измерений теплотехнических величин. Первое издание учебника выпущено в 1984 г.

Книга является учебником по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» для подготовки бакалавров по направлению «Теплоэнергетика».

УДК 621.1  
ББК 31.3

ISBN 5-7046-1046-3

© Издательство МЭИ, 2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	7
Раздел первый. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ .....	9
Глава первая. Общие сведения об измерениях .....	9
1.1. Измерения. Виды измерений .....	9
1.2. Средства измерений и их элементы .....	11
Контрольные вопросы .....	16
Глава вторая. Погрешности измерений и их оценка .....	17
2.1. Общие сведения о погрешностях .....	17
2.2. Оценка и учет случайных погрешностей .....	19
2.3. Метрологические характеристики средств измерений .....	24
2.4. Оценка погрешностей при измерениях .....	28
Контрольные вопросы .....	33
Раздел второй. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР .....	34
Глава третья. Общие сведения об измерении температур .....	34
3.1. Международная температурная шкала МТП-90 .....	34
3.2. Средства измерения температуры .....	36
Контрольные вопросы .....	38
Глава четвертая. Термометры расширения .....	39
4.1. Жидкостные стеклянные термометры .....	39
4.2. Термометры манометрические и биметаллические .....	42
Контрольные вопросы .....	46
Глава пятая. Термопреобразователи сопротивления .....	47
5.1. Общие сведения .....	47
5.2. Разновидности и конструкция термопреобразователей сопротивления .....	52
Контрольные вопросы .....	58
Глава шестая. Термоэлектрические преобразователи .....	59
6.1. Теоретические основы измерения температуры термоэлектрическим методом .....	59
6.2. Конструкция термоэлектрических преобразователей .....	68
6.3. Компенсационные устройства .....	72
6.4. Методика определения температуры контактными средствами измерений .....	76
Контрольные вопросы .....	91

<b>Глава седьмая. Аналоговые вторичные измерительные приборы и преобразователи</b> .....	92
7.1. Средства измерения и преобразования термосопротивлений .....	93
7.1.1. Потенциометрический метод измерения сопротивлений .....	93
7.1.2. Мостовые методы измерения сопротивления .....	97
7.1.3. Логометры .....	107
7.1.4. Преобразователи с унифицированным токовым выходным сигналом для ТС .....	110
7.2. Средства измерения и преобразования термоЭДС .....	116
7.2.1. Пирометрические милливольтметры .....	116
7.2.2. Потенциометры .....	117
7.2.3. Преобразователи с унифицированным токовым выходным сигналом для ТЭП .....	126
7.3. Вторичные пневматические приборы .....	129
<i>Контрольные вопросы</i> .....	130
<b>Глава восьмая. Цифровые вторичные измерительные приборы и преобразователи</b> .....	132
8.1. Общие сведения .....	132
8.2. Структура цифровых измерительных приборов и преобразователей .....	134
8.3. Основные элементы цифровых измерительных приборов .....	139
<i>Контрольные вопросы</i> .....	148
<b>Глава девятая. Измерение температуры тел по их тепловому излучению</b> .....	150
9.1. Основы теории измерения температуры тел по тепловому излучению .....	150
9.2. Монохроматические пирометры .....	152
9.3. Пирометры полного и частичного излучения .....	157
9.4. Пирометры спектрального отношения .....	162
9.5. Методика применения пирометров излучения .....	166
<i>Контрольные вопросы</i> .....	168
<b>Раздел третий. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, УРОВНЯ И РАСХОДА</b> .....	169
<b>Глава десятая. Методы и средства измерения давления и разности давлений</b> .....	169
10.1. Общие сведения .....	169
10.2. Жидкостные манометры и дифманометры .....	172
10.3. Деформационные манометры и дифманометры .....	179
10.4. Деформационные преобразователи давления с дистанционной передачей показаний .....	187
10.5. Электрические и прочие манометры .....	199
10.6. Грузопоршневые манометры .....	210
10.7. Методика измерения давления и разности давлений .....	213
<i>Контрольные вопросы</i> .....	216

<b>Глава одиннадцатая. Измерение уровня</b> .....	218
11.1. Уровнемсры с визуальным отсчетом .....	219
11.2. Гидростатические уровнемеры .....	220
11.3. Поплавковые и буйковые уровнемеры .....	231
11.4. Емкостные уровнемеры .....	234
11.5. Индуктивные уровнемеры .....	241
11.6. Радиоволиновые уровнемеры .....	245
11.7. Акустические уровнемеры .....	249
11.8. Термокондуктометрические уровнемеры .....	253
11.9. Измерение уровня сыпучих материалов .....	255
<i>Контрольные вопросы</i> .....	259
<b>Глава двенадцатая. Измерение расхода жидкостей, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве</b> .....	260
12.1. Общие сведения .....	260
12.2. Основы теории измерения расхода по перепаду давления в сужающих устройствах .....	262
12.3. Расчет градуировочной характеристики расходомера с сужающими устройствами .....	270
12.4. Оценка погрешности измерения расхода .....	277
12.5. Методика использования сужающих устройств для измерения расхода сред .....	280
12.6. Специальные сужающие устройства .....	289
<i>Контрольные вопросы</i> .....	292
<b>Глава тринадцатая. Расходомеры постоянного перепада давления, тахометрические и электромагнитные</b> .....	293
13.1. Ротаметры .....	293
13.2. Тахометрические счетчики и расходомеры .....	297
13.3. Электромагнитные расходомеры .....	305
<i>Контрольные вопросы</i> .....	311
<b>Глава четырнадцатая. Ультразвуковые, вихревые и массовые расходомеры. Теплосчетчики</b> .....	312
14.1. Ультразвуковые расходомеры .....	312
14.2. Вихревые и массовые расходомеры .....	317
14.3. Теплосчетчики .....	322
<i>Контрольные вопросы</i> .....	332
<b>Раздел четвертый. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ</b> .....	333
<b>Глава пятнадцатая. Измерение влажности</b> .....	333
15.1. Общие сведения о влажности газов, твердых и сыпучих тел .....	333
15.2. Методы измерения влажности воздуха и газа .....	334
15.3. Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел .....	340
<i>Контрольные вопросы</i> .....	342

<i>Глава шестнадцатая. Анализ состава газов</i> .....	343
16.1. Общие сведения .....	343
16.2. Объемные химические газоанализаторы .....	345
16.3. Тепловые газоанализаторы .....	347
16.4. Магнитные газоанализаторы .....	354
16.5. Оптические газоанализаторы .....	358
16.6. Электрические газоанализаторы .....	364
16.7. Хроматографические газоанализаторы .....	368
16.8. Элементы газовых хроматографов .....	372
16.9. Лабораторные и промышленные хроматографы .....	376
16.10. Эксплуатация и поверка газоанализаторов .....	379
<i>Контрольные вопросы</i> .....	382
<i>Глава семнадцатая. Анализ состава жидкостей</i> .....	383
17.1. Методы анализа состава жидкостей .....	383
17.2. Кондуктометрический метод анализа растворов .....	384
17.3. Электродные кондуктометры .....	388
17.4. Безэлектродные кондуктометры .....	393
17.5. Потенциометрический метод анализа .....	396
17.6. Рабочие и вспомогательные электроды потенциометрических анализаторов .....	398
17.7. Измерительные преобразователи рН-метров .....	406
17.8. Оптический метод анализа состава жидкостей .....	410
17.9. Измерение концентрации газов, растворенных в воде и паре .....	417
17.10. Эксплуатация анализаторов состава жидкостей и их вспомогательных устройств .....	419
<i>Контрольные вопросы</i> .....	423
<b>Раздел пятый. СИСТЕМЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ</b> .....	425
<i>Глава восемнадцатая. Системы промышленного теплотехнического контроля</i> .....	425
18.1. Информационные функции АСУ ТП .....	425
18.2. Элементы измерительных каналов .....	434
18.3. Анализ качества реализации информационно-измерительной функции АСУ ТП .....	436
18.4. Принципы построения функциональных схем теплотехнического контроля .....	442
18.5. Измерительные системы теплотехнических исследований .....	446
<i>Контрольные вопросы</i> .....	450
<b>Список литературы</b> .....	451
<b>Предметный указатель</b> .....	453
<b>Сайты приборостроительных фирм</b> .....	457

*Памяти профессора В.П. Преображенского,  
дорогого учителя, инициатора создания  
этого учебника посвящаем*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный уровень развития энергетических и других промышленных установок характеризуется интенсификацией технологических процессов, использованием агрегатов большой единичной мощности. Например, в теплотехнике единичные мощности возросли за 30 лет в десятки раз, а в атомной энергетике — в сотни. Примерно так же выросли скорости протекания технологических процессов. Количество измеряемых параметров на одном агрегате в настоящее время исчисляется тысячами. Надежность средств измерений и информационно-управляющих систем во многих случаях определяет надежность агрегата в целом. Без знания достоверных значений параметров и автоматического контроля за ними нельзя управлять процессом или агрегатом. Не менее важную роль играют измерения при проведении научных исследований и их автоматизации.

Последнее десятилетие характеризуется стремительным внедрением микропроцессорной техники не только во вторичные измерительные приборы, но и в первичные преобразователи, размещаемые непосредственно на технологических объектах. В микропроцессорных (интеллектуальных) средствах измерения коренным образом меняются функциональные возможности по обработке, преобразованию и методам представления результатов измерений. Эти приборы служат основой для построения промышленных управляющих микропроцессорных систем и информационно-управляющих систем научных исследований.

На базе микроэлектронной технологии разработан ряд миниатюрных чувствительных элементов (сенсоров), позволивших обеспечить контроль в промышленных условиях микроконцентраций веществ, присутствующих в растворах и газах. С их использованием созданы разнообразные приборы для экспрессного анализа и диагностики состояния технологических объектов.

За последние годы существенно расширилась номенклатура используемых в промышленности средств измерений, поскольку многие приборостроительные фирмы мира имеют представительства в России и продают свою продукцию. В связи с этим в учебнике рассмотрены как отечественные, так и зарубежные средства измерений.

Более полная информация о выпускаемых приборах и их характеристиках содержится на сайтах фирм, их адреса приведены в конце учебника.

В книге рассмотрены физические явления и принципы измерений, которые положены в основу работы того или иного сертифицированного средства измерений, приведены принципиальные схемы измерительных преобразователей и вторичных приборов, стандарты, регламентирующие их технические характеристики. Рассматриваются измерительные и управляющие системы, применяемые в промышленности, анализируются способы и качество выполнения ими информационных функций. Измерение представляется как единый процесс совместной работы чувствительных элементов, преобразователей и вторичных измерительных устройств, на которые влияют различные внешние факторы. Учебник предназначен для студентов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика» и полностью соответствует разделу «Метрология, стандартизация и сертификация» дисциплины «Управление, сертификация и инноватика». 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, 2, 8, 10, 16—18 написаны Г.М. Ивановой, 3—7, 9 — Н.Д. Кузнецовым, гл. 11—14 написаны совместно. В основу учебника положен курс лекций, читаемых авторами в течение многих лет в Московском ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции энергетическом институте (техническом университете).

Второе издание учебника подготовлено после смерти В.С. Чистякова, основного автора первого издания. Во второе издание вошли написанные им и несколько переработанные § 6.4 и глава 15.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам: проф. И.В. Кораблеву и проф. И.К. Петрову.

Все замечания и предложения по книге просим направлять по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Издательство МЭИ.

Авторы

## Раздел первый ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ

### Глава первая ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

#### 1.1. Измерения. Виды измерений

Измерение представляет собой процесс нахождения значения физической величины посредством опытов с помощью специальных технических средств [1—3].

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

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

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

По способу получения численного 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, которые с внедрением микропроцессорных средств измерения стали использоваться и в промышленных условиях.

*Прямыми измерениями* называются такие, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Например, измерение температуры термометром, давления — манометром. Результат может быть получен также с помощью *косвенных измерений*, когда численное значение находят на основании резуль-

татов прямых измерений, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью

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

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

Примерами косвенных измерений могут быть определение плотности тела 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 давления по высоте столба уравнивающей жидкости. При *совместных* и *совокупных* измерениях определяемые величины связаны с величинами, измеряемыми прямыми методами, системой уравнений. В случае совокупных измерений в уравнения входят одноименные величины.

Для реализации тех или иных принципов измерений 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 компенсационный (нулевой). В *методе непосредственной оценки* значение измеряемой величины определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора или сигналу преобразователя прямого действия. Этот метод применяется, например, при измерении давления пружинным манометром, силы тока — амперметром, температуры — термопреобразователем сопротивления.

В *дифференциальном методе* на измерительный прибор воздействует разность измеряемой и базовой (значение которой известно) величин, например измерение массы тела более одного килограмма при использовании гирь и показывающих весов с диапазоном измерения один килограмм. Данный метод позволяет получить достаточно точные результаты даже при измерении разности приборами невысокой точности. Однако для этого необходимо иметь базовую величину, значение которой близко к измеряемой величине и известно с высокой точностью.

В компенсационном (нулевом) методе измеряемую величину компенсируют другой величиной, значение которой известно с высокой степенью точности, разность между ними сводится к нулю за счет изменения известной величины. Применяемый в этом методе измерительный прибор (нуль-прибор) служит только для установления факта равенства двух величин или равенства нулю их разности. Примером компенсационного метода измерения может служить компенсационный метод измерения термоЭДС, измерение сопротивления уравновешенным мостом. Компенсационный метод обеспечивает высокую точность измерения, определяемую в основном точностью задания известной величины, которой уравнивается измеряемая величина, и чувствительностью нуль-прибора.

## 1.2. Средства измерений и их элементы

Средства измерений, в отличие от других технических устройств, имеют нормированные метрологические характеристики, т.е. определенные численные значения величин и свойств, определяющих точность и достоверность результатов измерения [4]. Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, называется *измерительным прибором*. Используя измерительный прибор, наблюдатель может прочитать или считать цифровое значение измеряемой величины. Измерительные приборы бывают аналоговые и цифровые. В *аналоговом измерительном приборе* показания являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины. В *цифровом приборе* показания даются в цифровой форме, которая является результатом дискретного преобразования сигналов измерительной информации.

Измерительные приборы подразделяются на показывающие и регистрирующие. В показывающих — значения считываются по шкале или цифровому табло. В *регистрирующих приборах* предусмотрена запись показаний на диаграммной бумаге, с помощью печати в цифровой форме или хранения информации в памяти запоминающего устройства. В измерительных приборах могут выполняться различные преобразования измеряемой величины, ее интегрирование по времени либо по другой независимой переменной.

*Измерительным преобразователем* называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной

информации в форме, удобной для передачи, преобразования, обработки или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Человек своими органами чувств не может воспринять сигнал измерительного преобразователя. Передача измерительной информации осуществляется изменением информативного параметра выходного сигнала преобразователя. Так, в дифференциально-трансформаторном преобразователе изменению положения сердечника соответствует пропорциональное изменение амплитуды сигнала переменного тока на выходе вторичной обмотки трансформатора.

*Первичный измерительный преобразователь* — это измерительный преобразователь, на вход которого воздействует измеряемая величина. Часто данные преобразователи называют датчиками. Часть первичного измерительного преобразователя, находящегося под непосредственным воздействием измеряемой величины, называется *чувствительным элементом*. В последнее время для обозначения чувствительных элементов с минимальной группой преобразующих используется термин *сенсоры*. Измерительные приборы и преобразователи в зависимости от рода измеряемой величины имеют соответствующие названия: термометры, термопреобразователи, манометры, преобразователи давления, расходомеры, преобразователи расхода и т.п.

Отсчетное устройство показывающих аналоговых измерительных приборов состоит из шкалы и указателя (стрелочного либо светового). На рис. 1.1 изображена шкала измерительного прибора. Те отметки шкалы, у которых проставлено числовое значение, называются числовыми или оцифрованными отметками. Промежуток между двумя соседними отметками есть деление шкалы. Разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам, называ-

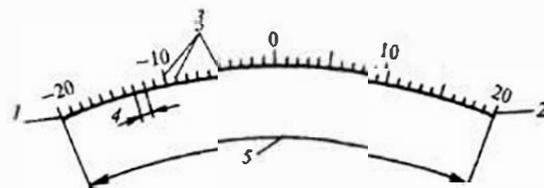


Рис. 1.1. Шкала измерительного прибора:  
1, 2 — нижний и верхний пределы измерения; 3 — отметки шкалы; 4 — деление шкалы; 5 — диапазон измерения

ется ценой деления шкалы. Шкала с равными делениями и постоянной ценой деления является равномерной.

Значения измеряемой величины, определяемые по отсчетному устройству и выраженные в принятых единицах измеряемой величины, являются показаниями измерительного прибора. Наименьшее значение измеряемой величины, указанное на шкале, называется начальным, а наибольшее — конечным значением шкалы. Область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями, является 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, называемых верхним и нижним пределами измерений.

Шкалы приборов как и диапазоны преобразования бывают односторонними, двусторонними и безнулевыми. В *односторонних* — один из пределов измерения прибора равен нулю (например, шкала 0...100 °С, шкала — 0,1...0 МПа). В *двусторонних* шкалах нулевое значение расположено в пределах шкалы (например, шкала -50...0...100 °С; шкала -0,1...0...0,15 МПа). В безнулевых шкалах в пределах шкалы нет нулевого значения (например, шкала 200...600 °С). В рассмотренных примерах диапазоны измерения, равные диапазонам показаний измеряемой величины, составят соответственно 100 °С, 0,1 МПа, 150 °С, 0,25 МПа и 400 °С.

В практике используются средства измерений одиночные и образующие комплекты, входящие в системы автоматического управления промышленными агрегатами и информационно-измерительные системы научных исследований. Создание как измерительных комплектов, так и систем требует использования унифицированных сигналов и стандартных интерфейсов.

В СССР была создана Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), которая строилась по блочно-модульному принципу и имела ветви, объединяющие приборы с пневматическими, гидравлическими, электрическими (токовыми, по напряжению, 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. В соответствии с этими стандартами измерительная информация может передаваться с помощью сигналов переменного и постоянного тока, импульсных, цифровых, давления воздуха.

В приборостроении в подавляющем большинстве случаев используют электрические сигналы для передачи информации. При использовании гармонических сигналов переменного тока аналоговым информативным параметром могут служить изменения амплитуды, фазы или частоты, называемые соответственно амплитудной, фазовой или частотной модуляцией. Стандартизованный уровень взаимной индуктивности составляет 0...10 мГн, частоты 4...10 кГц, напряжений — 1...1 В; 1...2 В; 1...3 В, где знак минус означает смену фазы сигнала. Недостатком передачи информации на переменном токе является влияние характеристик линий связи, внешних магнитных полей на информативный параметр, сложность фильтрации помех.

Большое распространение для передачи аналоговой информации получили сигналы постоянного тока, унифицированные значения которых составляют 0...5; 4...20 и редко используемое 0...20 мА. При допустимом сопротивлении нагрузки 1...2 кОм преобразователи могут работать с удаленными вторичными устройствами, при этом фильтрация наводок в линиях связи не вызывает затруднений. Зарубежные фирмы в основном используют сигнал 4...20 мА, поскольку при этом легко контролируется наличие обрыва цепи. В последнее время вследствие объединения рынков средств измерений этот сигнал и в РФ начал вытеснять сигнал 0...5 мА, который ранее был основным. Применяются также сигналы постоянного напряжения (экономичные) 0...5; 0...10 В при сопротивлении нагрузки более 10 кОм.

Для передачи информации используются дискретные по времени и непрерывные по информативному параметру импульсные сигналы. Импульсы могут быть модулированы по амплитуде (амплитудно-импульсная модуляция), по длительности (широтно-импульсная модуляция) и по частоте (частотно-импульсная модуляция), обозначаемых соответственно АИМ, ШИМ и ЧИМ. В электромагнитных расходомерах используется АИМ, в тахометрических и вихревых ЧИМ.

С широким распространением микропроцессорных (интеллектуальных) первичных приборов расширились их функциональные возможности и в качестве выходных сигналов стал использоваться циф-

ровой. Для передачи информации на персональные компьютеры, принтеры, для подключения к шинам микропроцессорных информационных и управляющих систем применяются различные интерфейсы, которые представляют собой комплекс технических и программных средств, обеспечивающих интеграцию приборов в системы. К числу таких интерфейсов относятся HART-протокол, RS-232, RS-485, PROFIBUS и др.

Во взрывоопасных производствах для передачи показаний на расстояние в качестве информативной величины используется давление воздуха. Унифицированный пневматический сигнал меняется от 20 до 100 кПа. При внутреннем диаметре линий связи между первичными и вторичными приборами 6...8 мм их длина может достигать 300 м.

Для сохранения средствами измерений их метрологических характеристик и обеспечения их безопасной эксплуатации условия последней должны быть согласованы с типом исполнения средств измерений по климатическим условиям и взрывозащите.

В зависимости от функций, которые приборы выполняют в процессе измерений, средства измерений делятся на рабочие, образцовые и эталоны. По последним нормативным документам расширено понятие эталонных средств измерения и исключено понятие образцовых, но в производстве понятие и обозначение образцовых средств измерений сохранилось. 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 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 измерений поверяются и градуируются рабочие средства измерения.

Эталоны служат для воспроизведения и хранения единиц физических величин и передачи их размера с помощью образцовых рабочих средствам измерений, применяемым в народном хозяйстве. Так осуществляется система передачи размеров единиц физических величин от эталонов всем средствам измерений.

### Контрольные вопросы

1. Чем отличаются прямые измерения от косвенных?
2. В чем состоит преимущество дифференциального и компенсационного методов измерения по сравнению с методом непосредственного измерения?
3. Какие виды шкал измерительных приборов вы знаете?
4. Чем отличаются аналоговые и цифровые измерительные приборы?
5. Сопоставьте системы передачи информации на переменном и постоянном токе.
6. В каких пределах изменяется унифицированный токовый сигнал?
7. Какие разновидности передачи информации с помощью импульсных сигналов вы знаете?
8. Каково назначение эталонов и рабочих 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 значение неизвестно и вместо него используют действительное значение физической величины [1, 4], которое находится экспериментально и настолько приближается к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него. Значение величины, найденное вследствие ее измерения, называется результатом измерения. Отклонение результата измерения  $x$  от действительного значения измеряемой величины  $x_d$  называется погрешностью измерения. Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины, называется *абсолютной погрешностью* измерения:

$$\Delta_x = x - x_d \quad (2.1)$$

Отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины называется *относительной погрешностью* измерения, выражаемой обычно в процентах

$$\delta_x = 100 \Delta_x / x_d \quad (2.2)$$

Измерительные приборы часто характеризуются *приведенной погрешностью*, которая определяется как отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению  $N_x$ . За нормирующее значение чаще всего принимается диапазон измерения прибора  $D$ . Приведенная погрешность, как правило, выражается в процентах

$$\gamma_x = 100 \Delta_x / N_x = 100 \Delta_x / D. \quad (2.3)$$

Погрешность измерений состоит из нескольких составляющих, классифицируемых по ряду признаков. По природе своего возникновения погрешности могут зависеть от средств измерений, метода измерения, процесса считывания и ряда других причин. Составляющая погрешности измерений, зависящая от погрешностей при-

меняемых средств измерений, называется *погрешностью средств измерений* (инструментальной).

Составляющая погрешности измерений, вызванная несовершенством метода измерений, называется *погрешностью метода измерений*, или методической погрешностью. Например, измеряем длину кривой линии линейкой. Во-первых, возникает методическая погрешность измерений за счет того, что использование линейки для измерения длины кривой является методом несовершенным. Во-вторых, действительная длина линейки может не соответствовать длине, указанной на шкале линейки. В связи с этим возникает составляющая погрешности, вызванная несовершенством средства измерения (линейки), которая является погрешностью средства измерения. Цель вычисления погрешностей измерений — 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, уменьшаем погрешности измерений. Однако способы повышения точности часто сложны и дорогостоящи. Поэтому следует сначала оценить целесообразную точность, которая зависит от конкретных условий и целей измерения, и в случае необходимости принять меры к ее повышению.

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

Систематические погрешности имеют определенное значение и знак, они могут быть устранены введением поправки. *Поправкой* называется значение величины, прибавляемой к полученному при измерении значению в целях исключения систематической погрешности.

Чтобы выявить случайную погрешность, необходимо провести ряд повторных измерений одной и той же величины. Если результат каждого измерения отличается от других результатов, то имеет место случайная погрешность. Оценить эти погрешности можно на основании теории вероятностей и математической статистики, ко-

рые дают методы оценки степени приближения результата измерений к действительному значению измеряемой величины, позволяют оценить вероятные границы погрешностей, а также уточнить результат, т.е. позволяют найти значение измеряемой величины более близкое к действительному значению, чем результат однократного наблюдения [5—7].

Значения систематической составляющей погрешности могут зависеть от значения измеряемой величины. В связи с этим используются понятия аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности. Под *аддитивной погрешностью* понимают долю систематической погрешности, которая остается постоянной в пределах диапазона измерений. Под *мультипликативной погрешностью* понимают долю систематической составляющей погрешности, меняющейся в зависимости от значения измеряемой величины. Так, для платиновых термопреобразователей сопротивления класса В, согласно ГОСТ Р50353, предел основной допускаемой погрешности составляет  $\Delta_r = \pm(0,3 + 0,005|t|)$ , °С. Аддитивная составляющая погрешности, определяемая разбросом сопротивлений термопреобразователей при температуре 0 °С, не должна превышать  $\pm 0,3$  °С, а мультипликативная, зависящая от отклонений чувствительности, должна находиться в пределах  $0,005|t|$  и суммироваться с аддитивной погрешностью.

## 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. К числу этих факторов относятся влияние температуры на те или иные части измерительного прибора, вибрация, обратимые изменения характеристик измерительного преобразователя, например в результате гистерезиса, трения в опорах измерительных приборов и т.п. 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. При многократных измерениях одной и той же величины и наличии случайных погрешностей результаты измерений также являются случайными величинами. Они будут полностью описаны с вероятностной точки зрения, если задана

функция распределения вероятностей  $F(x)$ , характеризующая вероятность  $P$  появления тех или иных значений  $x$ ,  $F(x) = P\{x_i \leq x\}$  [9]. Функция  $F(x)$  является монотонно нарастающей  $F(-\infty) = 0$ ,  $F(\infty) = 1$ ,  $dF(x)/dx \geq 0$ . Часто для характеристики случайной величины используется производная функции распределения  $f(x) = dF(x)/dx$ , называемая плотностью распределения.

В практике измерений при большом числе опытов ( $n > 20$ ) используется *нормальный закон* описания функции *распределения*. Он представляет двухпараметрический закон, для которого определено аналитическое выражение плотности

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

где  $m_x$  — наиболее вероятное значение измеряемой величины  $X$ , которое оценивается как среднее арифметическое результатов  $n$  измерений  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  по формуле

$$m_x = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n)/n = 1/n \sum_{i=1}^{i=n} x_i. \quad (2.5)$$

Чем больше число измерений  $n$ , тем ближе  $m_x$  к истинному значению измеряемой величины. В (2.4)  $\sigma$  является *средним квадратическим отклонением* случайной величины, определяемым по формуле

$$\sigma = \{[(x_1 - m_x)^2 + \dots + (x_n - m_x)^2]/(n-1)\}^{0,5} = \left[ \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - m_x)^2 / (n-1) \right]^{0,5} \quad (2.6)$$

Случайные погрешности для каждого результата измерения запишем в виде

$$\overset{\circ}{\Delta}_i = x_i - m_x, \quad (2.7)$$

они представляют центрированную случайную величину, для которой

$$\sigma = \left[ \sum_{i=1}^{i=n} \overset{\circ}{\Delta}_i^2 / (n-1) \right]^{0,5}, \quad f(\overset{\circ}{\Delta}) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) e^{-\overset{\circ}{\Delta}^2/(2\sigma^2)} \quad (2.8)$$

Значения функции нормального распределения определяются по (2.8) численными методами и приведены в табл. 2.1 для значений аргумента  $z = \overset{\circ}{\Delta}/\sigma$ . Графики нормального распределения

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z f(z) dz = 1/(\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} dz$$

Таблица 2.1

Значения нормальной функции распределения

$z$	$\Phi(z)$	$z$	$\Phi(z)$	$z$	$\Phi(z)$	$z$	$\Phi(z)$
-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	-1,95	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	0,7734	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		

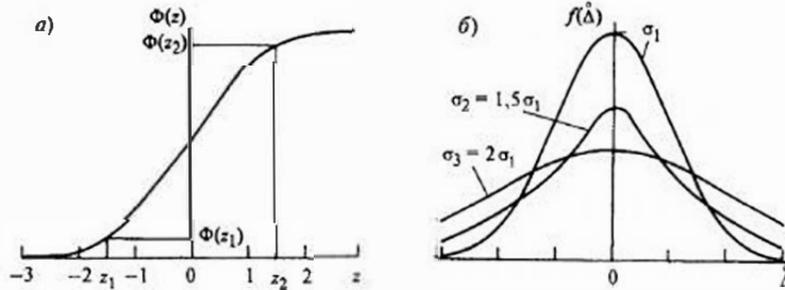


Рис. 2.1. Графики нормального распределения (а) и плотности распределения (б)

и плотности распределения  $f(\Delta)$  представлены на рис. 2.1. Увеличение  $\sigma$  (рис. 2.1, б) приводит к снижению максимума плотности распределения и растягиванию функции, поскольку

$$1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\Delta^2/(2\sigma^2)} d\Delta = 1.$$

Для результатов измерений случайной величины  $X$   $F(x) = F(\Delta) = \Phi(z)$ . С использованием данных табл. 2.1, зная  $m_x$  и  $\sigma$ , можно ответить на вопросы:

- какова вероятность появления результата измерения меньше  $x_1$ ;
- какова вероятность появления результата больше  $x_2$ ;
- какова вероятность появления результата измерений в интервале  $x_1 - x_2$ ?

Если  $z_1 = (x_1 - m_x)/\sigma$ ,  $z_2 = (x_2 - m_x)/\sigma$ , то  $P\{x \leq x_1\} = \Phi(z_1)$ ,  $P\{x > x_2\} = 1 - \Phi(z_2)$ ,  $P\{x_1 < x \leq x_2\} = \Phi(z_2) - \Phi(z_1)$ . При нормальном распределении случайных погрешностей 68 погрешностей из ста ( $P = 0,68$ ) по модулю меньше  $\sigma$ , 95 погрешностей ( $P = 0,95$ ) меньше  $2\sigma$  и только три погрешности из тысячи ( $P = 0,997$ ) будут иметь значения по модулю больше  $3\sigma$ . Интервал, в котором результаты измерений  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  находятся с заданной вероятностью, называется *толерантным*. Число  $\sigma$ , ограничивающее этот интервал, обозначают как  $t_p$ . В рассмотренном примере значения  $t_p$  равны соответственно 1; 2; 3. В связи с малой вероятностью появления погрешностей больше  $3\sigma$  ( $p = 0,003$ ) погрешности по модулю более

указанной величины обычно относят к промахам и исключают из ряда результатов измерений.

Для среднего значения результатов измерений  $m_x$  среднее квадратическое значение отклонения от истинного значения составляет  $\sigma_{m_x} = \sigma/\sqrt{n}$ . Чем больше проведено измерений, тем среднее значение ближе к истинному значению измеряемой величины. Для характеристики отклонения среднего значения от истинного вводится понятие доверительного интервала. *Доверительный интервал* откладывается в обе стороны от среднего значения ряда измерений  $m_x \pm \varepsilon_p$  и охватывает истинное значение  $X$  с заданной доверительной вероятностью  $p$ ,

$$\varepsilon_p = t_p \sigma_{m_x} = t_p \sigma / \sqrt{n} \quad (2.9)$$

Таким образом, с доверительной вероятностью  $p$  истинное значение измеряемой величины лежит в пределах доверительного интервала  $m_x \pm \varepsilon_p$ , но его нельзя точно указать.

Все рассмотренные выражения справедливы для большого числа однородных измерений, когда имеет место нормальный закон распределения погрешностей. В этом заключается особенность измерения случайных величин. При малом числе измерений для оценки доверительного интервала используется распределение Стьюдента, в котором значения  $t$  зависят не только от доверительной вероятности, но и от числа произведенных измерений. Значения  $t_{p(n-1)}$  в функции вероятности и числа произведенных измерений ( $n - 1$ ) приведены в табл. 2.2. Таким образом, при числе измерений менее 20—30 для оценки доверительного интервала следует использовать распределение Стьюдента и тогда

$$\varepsilon_n = t_{p(n-1)} \sigma / \sqrt{n} \quad (2.10)$$

Снижение числа измерений приводит к расширению доверительного интервала при той же самой доверительной вероятности. Так, если для нормального распределения вероятности 0,95 соответствует  $t_p = 2$ , то при числе измерений 10 и 3 и использовании распределения Стьюдента  $t_{p(n-1)}$  составляет соответственно 2,26 и 4,30.

Таблица 2.2

Значения  $t_{p(n-1)}$  распределения Стьюдента для симметричного интервала и  $t_{p(n-1)}/\sqrt{n}$

p	0,683		0,9		0,95		0,997	
	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)}/\sqrt{n}$	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)}/\sqrt{n}$	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)}/\sqrt{n}$	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)}/\sqrt{n}$
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

### 2.3. Метрологические характеристики средств измерений

Измеряемая величина, поступающая на вход средства измерений, в целях обобщения, называется входным сигналом (величиной) средства измерений, например давление, подводимое к манометру; температура среды для термоэлектрического преобразователя, погруженного в эту среду. Сигнал или показания, получаемые на выходе средства измерений, называются выходным сигналом (величиной) средства измерений, например показание манометра, считываемое по шкале; значение термоЭДС, развиваемой термоэлектрическим преобразователем. Зависимость выходного сигнала средства измерений  $y$  от входного сигнала  $x$ , представленная в виде таблицы, графика или формулы, называется *номинальной статической характеристикой* (НСХ) средства измерений, часто называемой градуировочной. Отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора  $\Delta y$  к вызвавшему его изменению входной величины

(сигнала)  $\Delta x$  называется *чувствительностью* средства измерения. Применительно к измерительным преобразователям это отношение называют *коэффициентом преобразования* (коэффициентом передачи). Чувствительность определяется формулой

$$S = \Delta y / \Delta x. \quad (2.11)$$

Чувствительность является в большинстве случаев именованной величиной, так для термоэлектрического преобразователя это мВ/°С, для термопреобразователя сопротивления — Ом/°С. Качество средства измерений, отражающее неизменность во времени его метрологических свойств, называется *стабильностью* средств измерений. Как правило, она характеризуется стабильностью его градуировочной характеристики.

Выходной сигнал средства измерений при малых изменениях входной величины может на них не реагировать. В связи с этим вводится такая характеристика, как *порог чувствительности* средства измерения. Он определяется минимальным значением изменения входного сигнала, вызывающим видимые изменения выходного сигнала. В технической документации на приборы порог чувствительности обычно дается в виде приведенного к диапазону измерения значения, выраженного в процентах.

Выходной сигнал средств измерений зависит от направления подхода к значению измеряемой величины: со стороны меньших (снизу) или больших (сверху) значений. Неоднозначность градуировочной характеристики при увеличении и уменьшении входной величины характеризуется *вариацией*. *Вариацией* называется наибольшая разность между выходными сигналами (показаниями) средства измерений, соответствующими одному и тому же значению входной величины, или наибольшая разность входных сигналов, соответствующих одному и тому же выходному сигналу. К числу метрологических характеристик средств измерений относится также рассмотренный диапазон измерений.

Физическая величина, не являющаяся величиной, измеряемой данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений, называется *влияющей 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 называются нормальными. При этом все другие влияющие вели-

чины также должны иметь нормальные значения. При нормальных условиях определяется *основная погрешность* средств измерений.

Кроме нормальных значений в стандартах или технических условиях на средства измерений устанавливается рабочая область значений влияющих величин, в пределах которой нормируется *дополнительная погрешность* этих средств измерений. Дополнительные погрешности средств измерений суммируются с основной.

В зависимости от степени защищенности средств измерений от внешних воздействий измерительные приборы и преобразователи подразделяются на обыкновенные, виброустойчивые, пылезащищенные, водозащищенные, защищенные от агрессивной среды, взрывобезопасные и т.д. Это дает возможность выбирать средства измерения применительно к конкретным условиям работы.

Для характеристики погрешностей рабочих средств измерений используется такая характеристика как класс точности, который устанавливается исходя из значений основных и дополнительных погрешностей, вариации и порога чувствительности. *Классом точности* называется обобщенная характеристика средства измерений, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность. В соответствии с ГОСТ 8.401-80 [10] класс точности может определять пределы основных допускаемых погрешностей как абсолютных (2.1), так относительных (2.2) и приведенных (2.3). Этим случаям соответствуют его различные обозначения в технической документации, на шкалах и шильдиках (таблички, закрепленные на видимом месте корпусов приборов, с указанием их характеристик).

Предел абсолютной основной погрешности нормируется в виде числа или выражения

$$\Delta_{\text{пр}} = \pm [a + b(|X| - X_n)], \quad (2.12)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные;  $X_n$  — начальное значение измеряемой величины  $X$ .

При этом способе нормирования пределов погрешностей класс точности обозначается латинскими буквами. Так, для медного преобразователя сопротивления класса А  $\Delta_r = \pm (0,15 + 0,002 |I|)$ , °С.

Предел основной относительной погрешности выражается в процентах и нормируется в виде числа или выражения

$$\delta_{\text{пр}} = \pm [c + d(X_b/X - 1)], \quad (2.13)$$

где  $c$ ,  $d$  — постоянные;  $X$  — измеряемая величина;  $X_b$  — верхний предел измерения.

Класс точности при таком способе нормирования обозначается на шкале прибора числом, обведенным окружностью, или дробью  $c/d$ . Так, если на шкале цифрового вольтметра указано 0,1/0,02, то  $\delta_{\text{пр}} = \pm [0,1 + 0,02(X_b/X - 1)]$ .

При нормировании предела основной приведенной погрешности класс точности задается числом, выбираемым из ряда (1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6)  $10^n$ , где  $n$  может иметь значения 1; 0; -1; -2 и т.д.

Примеры форм нормирования пределов основных погрешностей и обозначения соответствующих им классов точности приведены в табл. 2.3.

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

ГОСТ 8.009-84 [4] предусматривает более широкий круг нормируемых метрологических характеристик средств измерений, базирующихся на применении вероятностно-статистических характеристик. Кроме характеристик суммарной погрешности средств измерений указываются также характеристики систематической и случайной составляющих погрешности. Для систематической составляющей погрешности средств измерений данного типа устанавливается либо предел ее допускаемого значения  $\Delta_{\text{ср}}$ , либо указывается значение математического ожидания  $M[\Delta_{\text{с}}]$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma(\Delta_{\text{с}})$ . Для случайной составляющей погрешности уста-

Таблица 2.3

Примеры форм нормирования погрешностей и обозначений классов точности

Форма нормирования основной погрешности	Формула расчета предела основной допускаемой погрешности	Пределы основной допускаемой погрешности	Обозначение класса точности	
			в документации	на средствах измерений
Абсолютная	(2.1)	$\Delta_{\text{пр}} = \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$	0,2 °С	А
	(2.12)	$\Delta_{\text{пр}} = \pm (0,3 + 0,005  I )$ , °С	0,3 + 0,005 I	В
Относительная	(2.2)	$\delta_{\text{пр}} = \pm 1,5 \%$	1,5	(1,5)
	(2.13)	$\delta_{\text{пр}} = \pm [0,3 + 0,02(X_b/X - 1)]$ , %	0,3/0,02	0,3/0,02
Приведенная	(2.3)	$\gamma_{\text{пр}} = \pm 2 \%$	2	2

навливаются предел допускаемого значения среднеквадратического отклонения  $\sigma_d(\hat{\Delta})$ .

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.

Этот способ нормирования метрологических характеристик средств измерения позволяет получать наиболее вероятные значения результатов измерений и оценки погрешностей, близкие к действительным значениям. Нормирование перечисленных характеристик требует значительных затрат на их получение и подтверждение, в связи с чем они получили ограниченное распространение.

## 2.4. Оценка погрешностей при измерениях

Методика оценки погрешностей зависит от вида измерений и используемых средств измерений [8, 11, 12].

*Прямые технические измерения* выполняются рабочими средствами измерений. Ввиду значительного вклада систематической составляющей в погрешность рабочих средств измерений такие измерения выполняются однократно и действительное значение измеряемой величины определяется как  $X_d = X \pm \Delta_{пр}$ , где  $X$  — показания прибора, а  $\Delta_{пр}$  определяется классом прибора. В случае нормирования пределов основных относительных  $\delta_{пр}$  и приведенных  $\gamma_{пр}$  погрешностей соответственно

$$\Delta_{пр} = \pm \delta_{пр} X / 100 \text{ и } \Delta_{пр} = \pm \gamma_{пр} D / 100,$$

где  $D$  — диапазон измерения прибора.

Таким образом, класс точности, определяя  $\Delta_{пр}$ , характеризует область неопределенности результата измерений.

Прямые технические измерения величины  $X$  могут производиться измерительным комплектом, включающим как минимум первичный преобразователь и вторичный показывающий прибор. В более сложном случае значение  $X$  считывается с экрана монитора, при этом оно является результатом преобразования измеряемой величины средствами, входящими в соответствующий измерительный канал информационной управляющей системы. Для каждого элемента, входящего в измерительный комплект или канал, метроло-

гические характеристики задаются в объеме, позволяющем определить предел допускаемой погрешности результата измерений.

Существуют два метода оценки погрешностей измерительных комплектов или каналов. При использовании первого метода производится оценка пределов допускаемых погрешностей измерительной системы по пределам допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, определяемых их классом точности. Так, максимальная относительная погрешность при измерении давления измерительным комплектом, включающим преобразователь давления и вторичный показывающий прибор с пределами относительных погрешностей соответственно  $\pm 0,25$  и  $\pm 0,5$  %, не превысит  $\pm 0,75$  %. Суммирование пределов допускаемых погрешностей особенно при большом числе последовательно включенных элементов дает завышенную оценку предела погрешности, поскольку вероятность совпадения знаков погрешностей и их предельных значений у всех элементов системы невелика. В связи с этим допускаемая погрешность измерительной системы оценивается как корень квадратный из суммы квадратов пределов допускаемых погрешностей элементов [4]:

$$\gamma_{пр} = \pm (\gamma_{пр1}^2 + \gamma_{пр2}^2 + \dots + \gamma_{прn}^2)^{0,5} \quad (2.14)$$

Этот способ достаточно строг, если погрешности элементов независимы и определяются случайными погрешностями. При этом пределы допускаемых погрешностей соответствуют одинаковым доверительным вероятностям при однотипных законах распределения [11]. В остальных случаях применение выражения (2.14) может быть некорректно.

Другой подход к оценке погрешности связан с допущением определяющего влияния на погрешность систематической составляющей, которая для типа средства измерений равномерно распределена в зоне  $\pm \gamma_{пр}$ . Поскольку для такого распределения  $\sigma = \gamma_{пр} / \sqrt{3}$ , то с доверительной вероятностью 0,95 погрешность измерительной системы, состоящей из  $n$  элементов, будет находиться в пределах

$$\gamma_{пр} = \pm 1,1 (\gamma_{пр1}^2 + \gamma_{пр2}^2 + \dots + \gamma_{прn}^2)^{0,5} \quad (2.15)$$

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. С помощью этого метода можно получить наиболее вероятное значение измеряемого параметра и оценки погрешностей, близкие к действительным

значениям. Для реализации данного метода должны быть известны или определены в результате соответствующих испытаний статистические характеристики систематической и случайной составляющих погрешности  $m(\Delta_{ci})$ ,  $\sigma(\Delta_{ci})$ ,  $\sigma(\Delta_i)$  для каждого элемента системы. В этом случае результирующая погрешность системы составит

$$\Delta = \sum_{i=1}^{i=n} m(\Delta_{ci}) \pm K \left[ \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_i^2(\Delta) \right]^{0,5}, \quad (2.16)$$

где  $\sigma_i(\Delta) = [\sigma^2(\Delta_{ci}) + \sigma^2(\Delta_i) + 1/12(H_i^2 + \mu_i^2)]^{0,5}$ ,  $H_i$ ,  $\mu_i$  — вариация средств измерений и цена единицы последнего разряда цифрового кода при дискретном преобразовании измеряемого сигнала.

При выполнении прямых лабораторных измерений применяют средства измерений повышенной точности с устраненными систематическими погрешностями. Производятся многократные измерения величины  $X$ . Результаты измерений  $x_1, x_2, \dots, x_n$  содержат случайные погрешности и являются случайными величинами. В соответствии с [5, 6] результаты многократных измерений должны быть представлены в определенном виде. Помимо среднего значения, являющегося наиболее вероятным значением измеряемой величины, для фиксированной доверительной вероятности (0,9; 0,95; 0,99 и др.) должны быть указаны границы доверительного интервала, которые зависят от распределения случайных погрешностей.

В зависимости от числа произведенных измерений в основном используются распределения нормальное (Гаусса) или Стьюдента. В этом случае по (2.5) рассчитывается среднее значение результатов измерений, которое приписывается измеряемой величине. Для определения границ доверительного интервала, соответствующих выбранной доверительной вероятности  $p$ , по (2.6) рассчитывается  $\sigma$  и по (2.9) или (2.10)  $\varepsilon_p$ . С доверительной вероятностью  $p$  действительное значение измеряемой величины лежит в пределах интервала  $m_x \pm \varepsilon_p$ .

**Косвенные измерения.** В практике технических и лабораторных измерений часто встречаются косвенные измерения, когда определяемая величина  $Z$  является функцией нескольких величин  $X, Y, \dots$ , измеряемых прямыми методами (1.2). Косвенные измерения как и прямые могут быть техническими и лабораторными. При косвенных технических измерениях для каждой из измеряемых прямыми методами величин известны пределы допускаемых погрешностей  $\Delta_{px}, \Delta_{py}, \dots$ , определяемых классами точности приборов.

По результатам однократных измерений  $X, Y, \dots$  рассчитывается  $Z$ . Поскольку  $\Delta_{px} \ll X, \Delta_{py} \ll Y, \dots$ , то, пренебрегая высшими производными, находим оценку сверху погрешности определения  $Z$ :

$$\Delta_{pz} = |\partial f / \partial x| \Delta_{px} + |\partial f / \partial y| \Delta_{py} + \dots \quad (2.17)$$

При нескольких переменных, измеряемых прямыми методами, пределы погрешностей суммируют под радикалом, поскольку расчет по (2.17) дает завышенную оценку погрешности,

$$\Delta_{pz} = [(\partial f / \partial x)^2 \Delta_{px}^2 + (\partial f / \partial y)^2 \Delta_{py}^2 + \dots]^{0,5}. \quad (2.18)$$

Если функциональная зависимость имеет вид  $z = ax^\alpha y^\beta$ , где  $a$  — постоянная;  $\alpha, \beta$  — любые показатели степени, то легко показать, что предельное значение относительной погрешности составит

$$\gamma_{pz} = \Delta_{pz} / Z = |\alpha| \Delta_{px} / X + |\beta| \Delta_{py} / Y,$$

или

$$\gamma_{pz} = [\alpha^2 (\Delta_{px} / X)^2 + \beta^2 (\Delta_{py} / Y)^2]^{0,5}. \quad (2.19)$$

Из выражения (2.19) видно, что при одинаковых относительных погрешностях измерения диаметра и высоты цилиндра вклад в относительную погрешность определения объема цилиндра погрешности измерения диаметра будет вдвое превышать вклад погрешности измерения высоты.

При косвенных лабораторных измерениях каждая из величин  $X, Y, \dots$ , определяемых прямыми методами, измеряется многократно средствами измерения повышенной точности, систематические погрешности при этом исключены. В результате обработки прямых измерений для каждой величины  $X, Y, \dots$  определены  $m_x, m_y, \dots$  и  $\sigma_x, \sigma_y, \dots$ . Значение  $Z$  рассчитывается как  $f(m_x, m_y)$ , и при независимых погрешностях измерений

$$\sigma_z = [(\partial f / \partial x)^2 \sigma_x^2 + (\partial f / \partial y)^2 \sigma_y^2 + \dots]^{0,5}. \quad (2.20)$$

Для оценки границ доверительного интервала необходимо знать распределение погрешностей определения  $Z$ , которое зависит от вида функциональной зависимости и в общем случае неизвестно.

**Влияние условий измерений на погрешности средств измерений.** Средства измерений, установленные на технологических объектах, подвержены влиянию целого ряда факторов, к числу которых относятся температура окружающей среды, вибрация, повышенная влажность, магнитные поля, колебания напряжения и частоты питания, запыленность и пр. Все они могут служить источником дополнительных погрешностей, которые суммируются с основной,

могут превышать последнюю в несколько раз. Гарантией качественных измерений является грамотный выбор при проектировании модификации прибора, ориентированной на условия эксплуатации, имеющие место на конкретном технологическом объекте. Не менее важно соблюдение правил монтажа и эксплуатации приборов, их периодического обслуживания и поверки.

Большинство измеряемых технологических величин являются нестационарными, т.е. меняющимися во времени. Частоты их изменений весьма разнообразны и зависят как от самой величины, так и от технологического процесса и объекта. Область требуемых рабочих частот прибора зависит от его назначения, так работа в составе системы автоматического регулирования какого-либо технологического процесса, как правило, не требует его высокого быстродействия, тогда как при исследовании характеристик двигателей внутреннего сгорания средства измерений должны быть малоинерционными. При несогласованности областей рабочих частот приборов и частот изменения измеряемых параметров возникают динамические погрешности, которые могут во много раз превышать пределы допускаемых значений. В связи с этим в технической документации на средства измерений указываются их динамические характеристики, которыми надо руководствоваться при выборе приборов.

Одним из важных факторов, влияющим на метрологические характеристики средств измерений, является продолжительность эксплуатации. С течением времени меняются упругие свойства чувствительных элементов манометров и дифманометров, изнашиваются находящиеся в потоке элементы расходомеров и т.д. Для выявления метрологических отказов средств измерений проводится их периодическая поверка. Приборы, показания которых используются при взаимных расчетах поставщиков и потребителей энергоресурсов для обеспечения безопасной работы оборудования и контроля за состоянием окружающей среды, проходят обязательную периодическую поверку в организациях государственной метрологической службы.

Средства измерений, обеспечивающие ведение технологических процессов, проходят добровольную периодическую калибровку, которую производят с помощью эталонов юридические лица, имеющие аккредитацию метрологических служб на выполнение таких работ.

## Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие приведенной и относительной погрешности измерений?
2. Какие разновидности систематических погрешностей вы знаете?
3. Что характеризует функция распределения случайных погрешностей?
4. Поясните понятия доверительной вероятности и доверительного интервала.
5. Перечислите основные метрологические характеристики средств измерений.
6. Какие виды погрешностей определяют классы точности и как они обозначаются на шкалах и шильдиках измерительных приборов и преобразователей?
7. Как рассчитывается погрешность результатов косвенных измерений, если они проводятся рабочими измерительными приборами и лабораторными с исключенными систематическими погрешностями?
8. Какие разновидности поверки средств измерений вы знаете?

## Раздел второй ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

### Глава третья

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУР

### 3.1. Международная температурная шкала МТШ-90

Температура, наряду с объемом и давлением, является одной из трех основных величин, характеризующих состояние вещества. Измерение температуры занимает 80 % в объеме промышленных измерений, поскольку значение температуры в большинстве случаев определяет качество произведенной продукции, эффективность ведения технологических процессов, безопасность работы оборудования и прочее [12—14]. Температура характеризует тепловое состояние вещества и пропорциональна средней кинетической энергии его молекул.

Непосредственное измерение температуры невозможно. В принципе все явления, происходящие под воздействием тепла (например, расширение веществ, изменение электрического сопротивления, излучение нагретых тел), можно использовать для измерения температуры. Однако количественная оценка возможна лишь при соотношении показаний термометра с некоторой эталонной температурой, например с температурой тройной точки воды.

Для унификации результатов измерений различными средствами, основанными на различных методах, применяется международная температурная шкала. По мере развития техники температурных измерений использовались различные температурные шкалы: МТШ-27, МПТШ-68, МТШ-90 (цифры указывают год международного принятия шкалы).

В метрологическом аспекте температура является величиной, не подчиняющейся закону аддитивности (аддитивность — свойство величины, состоящее в том, что значение величины, соответствующее целому объекту, равно сумме значений величин, соответ-

ствующих его частям, каким бы образом не был разбит объект). Поэтому для измерения температуры необходимо иметь не только единицу измерения, но и шкалу, в которой температура определена через какую-либо подчиняющуюся закону аддитивности величину, связанную с температурой функциональной зависимостью (например, ЭДС, сопротивление и т.п.).

Идеальная температурная шкала — это термодинамическая температурная шкала, основанная на втором законе термодинамики. Единицей термодинамической температуры  $T$  является Кельвин  $K$  —  $1/273,16$  часть температуры тройной точки воды. Широко применяется практика выражения температуры в виде ее значения относительно точки плавления льда ( $273,15 K$ ). Выраженная таким образом температура известна как температура Цельсия (символ  $t$ ) и определяется как  $t = T - 273,15$ . Единицей температуры Цельсия является градус Цельсия (символ  $^{\circ}C$ ), размер которого равен Кельвину (это означает, что температурный интервал  $1^{\circ}C = 1 K$ ). В Международной температурной шкале 1990 г. (МТШ-90) используются как температура Кельвина (символ  $T_{90}$ ), так и температура Цельсия (символ  $t_{90}$ ).

Для измерения аддитивных величин (например, длины, массы) можно опираться на воспроизведение размеров их единиц. Так как температура не подчиняется закону аддитивности, то воспроизведение одной эталонной точки (тройной точки воды) не позволит точно определить другие температурные точки. Поэтому необходимо точное воспроизведение нескольких температурных точек (они называются реперными), которым присвоено определенное значение температур, совокупность их образует температурную шкалу. Между реперными точками шкалы воспроизводится с помощью эталонных средств, в которых температура определяется через какую-либо аддитивную величину, связанную с температурой функциональной зависимостью заданного вида. Коэффициенты этой зависимости находятся по температурам реперных точек.

Международная температурная шкала МТШ-90 охватывает диапазон от  $0,65 K$  до наивысшей температуры, доступной измерению в соответствии с законом излучения Планка для монохроматического излучения. Она разбита на ряд поддиапазонов, содержащих реперные точки, внутри которых используются определенные типы термометров. В интервале от  $0,65$  до  $5 K$  температура  $T_{90}$  определяется зависимостью давления насыщенных паров  $^3He$  и  $^4He$  от тем-

пературы. В интервале от 3 К до тройной точки неона (24,5561 К) температура  $T_{90}$  определяется с помощью гелиевого термометра постоянного объема, отградуированного по трем реперным точкам. В интервале между тройной точкой водорода (13,8033 К) и точкой затвердевания серебра (961,78 °С) температура  $T_{90}$  находится с помощью платиновых термометров сопротивления (их два типа), отградуированных в определенных наборах реперных точек. Выше точки затвердевания серебра температура  $T_{90}$  определяется в соответствии с законом излучения Планка и с помощью реперной точки. Некоторые из принятых поддиапазонов перекрываются. В области перекрытия могут применяться эталонные термометры любого из перекрывающихся поддиапазонов без предпочтения какому-либо. Кроме того, число реперных точек превышает минимально требуемое количество — возможно использование любых из них для заданного диапазона.

До принятия МТШ-90 использовалась Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68) с нижним пределом 13,81 К. Для диапазона от 0,5 до 30 К использовалась временная температурная шкала 1976 г. (ВТШ-76). По сравнению с МТШ-90 шкала МПТШ-68 имела меньшее число реперных точек, кроме того, в области температур от 630,74 до 1064,43 °С (точка затвердевания золота) в качестве эталонного прибора использовался термоэлектрический термометр (его использование в МТШ-90 не предусматривается). Существуют определенные расхождения между значениями температур по этим шкалам. При  $t < 600$  °С разница незначительна, в интервале (700...1400) °С она не превышает 0,4 °С, однако с повышением температуры она нарастает и при 4000 °С достигает 2,5 °С. В интервале (660...900) °С разность ( $t_{90} - t_{68}$ ) положительна, при более высоких температурах отрицательна.

### 3.2. Средства измерения температуры

Средства измерения температуры производят значительное количество отечественных и зарубежных фирм. В настоящее время используются различные методы измерения температуры, которые можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные [15—17].

Таблица 3.1

Средства измерения температуры

Тип средства измерения	Разновидность средства измерения или первичного преобразователя	Предел длительного применения, °С	
		нижний	верхний
Термометры расширения	Жидкостные стеклянные	-100	600
	Манометрические	-200	600
	Биметаллические	-70	600
Термометры сопротивления	Металлические (проводниковые) термопреобразователи сопротивления	-260	1100
	Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления	-100	300
Термоэлектрические термометры	Термоэлектрические термопреобразователи (при длительном применении)	-200	2200
Кварцевые термометры	Терморезонансные преобразователи	0	200
Пирометры	Монохроматические	800	4000
	Полного и частичного излучения	30	2500
	Спектрального отношения	-35	2800

В *контактных* методах требуется непосредственный контакт первичного преобразователя с контролируемым объектом или средой. К ним относятся термометры расширения (стеклянные, манометрические и биметаллические), термометры сопротивления, термоэлектрические термометры, кварцевые преобразователи температуры в частоту.

*Бесконтактные* методы позволяют измерять температуру на расстоянии от контролируемого объекта или среды. Этот метод используется в пирометрах.

В табл. 3.1 приведены наиболее распространенные средства измерения температуры и примерные пределы их применения.

Все средства измерения, предназначенные для измерения температуры контактным методом, называются *термометрами*, а для измерения температуры бесконтактным методом — *пирометрами*. В состав термометра, как правило, входят термопреобразователь, линия связи и измерительный прибор. В состав пирометра часто входит пирометрический преобразователь.

### Контрольные вопросы

1. Как воспроизводится Международная температурная шкала?
2. Какие единицы измерения температуры вы знаете?
3. С помощью каких средств измерения воспроизводится температурная шкала между реперными точками?
4. Какие методы измерения температуры вы знаете?
5. Какие контактные средства измерения температуры вы знаете и в какой области температур они используются?
6. Какие бесконтактные средства измерения температуры вы знаете и в какой области температур они используются?

## Глава четвертая ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

### 4.1. Жидкостные стеклянные термометры

Принцип действия *стеклянных жидкостных термометров* основан на тепловом расширении жидкостей [12]. При изменении температуры изменяется объем термометрической жидкости, при этом изменяется положение уровня жидкости в капилляре, по которому отсчитывается значение температуры. Жидкостные термометры изготавливаются из различных марок стекла резервуаров и наполняются различными термометрическими жидкостями или ртутью. Большим преимуществом последней является то, что она не смачивает стекло и легко может быть получена химически чистой. Цена деления стеклянных термометров находится в пределах  $(0,01...10)^\circ\text{C}$  и определяется назначением термометра и видом применяемой термометрической жидкости. Основная масса выпускаемых термометров по своей конструкции делится на две группы:

1) термометры с вложенной шкалой, у которых шкальная пластина вставлена внутрь оболочки и жестко скреплена с капилляром (рис. 4.1, а);

2) термометры палочного типа, у которых шкала нанесена непосредственно на внешнюю поверхность толстостенного капилляра (рис. 4.1, б).

По способу применения термометры рассчитаны либо на частичное погружение

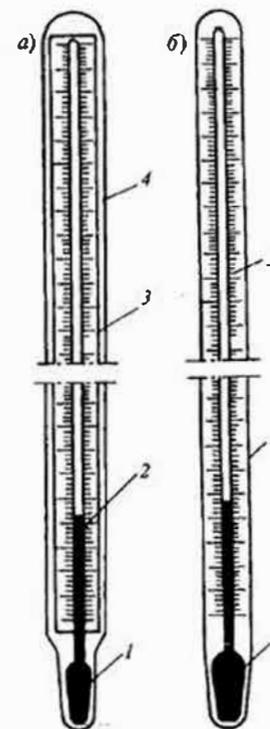


Рис. 4.1. Лабораторные ртутные термометры: а — с вложенной шкалой: 1 — стеклянный резервуар; 2 — капилляр; 3 — шкальная пластина; 4 — стеклянная оболочка; б — палочный: 1 — резервуар; 2 — толстостенный капилляр; 3 — шкала на наружной поверхности капилляра

в контролируемую среду (неполное погружение), либо на погружение до считываемой температуры (полное погружение). Точные термометры полного погружения снабжаются графиком поправок, которые следует алгебраически суммировать с показаниями термометра. Если термометр полного погружения погружен неполностью, то необходимо вводить поправку на выступающий столбик термометрической жидкости (с учетом знака):

$$\Delta t = 0,00016 k l (t - \Theta), \quad (4.1)$$

где  $l$  — длина выступающего столбика в градусах шкалы термометра;  $t$  — температура контролируемой среды, отсчитанная по термометру;  $\Theta$  — средняя температура выступающего столбика, определяемая вспомогательным термометром;  $k$  — коэффициент, индивидуальный для каждой термометрической жидкости и сорта используемого стекла.

По назначению жидкостные термометры подразделяются на лабораторные, технические (производственные) и рабочие эталоны (образцовые). Лабораторные используются при научных исследованиях и градуируются при полном погружении. Их нижний предел измерения лежит внутри диапазона от  $-30$  до  $300$  °С, верхний — внутри диапазона от  $20$  до  $600$  °С. Цена деления находится в пределах от  $0,1$  до  $2$  °С. Предельная погрешность зависит от цены деления и диапазона измерения и находится в пределах от  $0,3$  до  $4$  °С (она может превышать цену деления).

Технические термометры градуируются при погружении только суженной хвостовой части, которая может быть прямой и угловой (под углом  $90$  или  $120$  °, рис. 4.2). Они могут иметь специальное назначение (медицинские, метеорологические и т.д.) или особые технические характеристики (вибростойкие, электроконтактные). Допускаемая погрешность техниче-

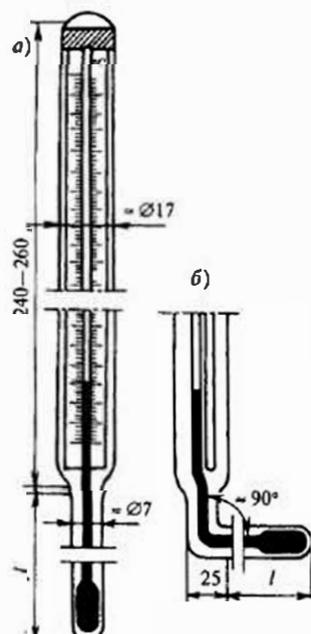


Рис. 4.2. Технические стеклянные термометры: а — прямой; б — угловой

Таблица 4.1

Технические характеристики стеклянных термометров

Тип	Наименование	Пределы измерения, °С	Цена деления, °С	Предельная погрешность, °С
Тл-4	Лабораторный	Нижний из интервала $-30 \dots 240$ , верхний из интервала $20 \dots 310$	$0,1; 0,2$ в зависимости от пределов	$\pm(0,2 \dots 1)$ в зависимости от пределов
ТР-1	Рабочий эталон (образцовый)	Нижний из интервала $0 \dots 56$ , верхний из интервала $4 \dots 60$	$0,01$	$\pm 0,05$
СП-40	Специальный виброустойчивый	$0 \dots 100$ $0 \dots 200$ $0 \dots 300$ $0 \dots 400$	$0,5$	$\pm 1$
ТПК-М	Электроконтактный с регулируемым положением контакта прямой или угловой	$-35 \dots 70$	$1$	$\pm 1$
		$0 \dots 100$	$1$	$\pm 1$
		$0 \dots 200$	$2$	$\pm 2$
		$0 \dots 300$	$5$	$\pm 5$
ТТ, ТТМ	Технический прямой или угловой	$-35 \dots 50$	$1$	$\pm 1$
		$0 \dots 100$	$1$	$\pm 1$
		$0 \dots 160$	$2$	$\pm 2$
		$0 \dots 200$	$2$	$\pm 2$
		$0 \dots 350$	$5$	$\pm 5$ на участке $0 \dots 300$
		$0 \dots 450$	$5$	$\pm 10$ на участке $300 \dots 450$

ских термометров зависит от цены деления и измеряемой температуры и может значительно превышать цену деления.

Образцовые термометры (для точных измерений типа ТР) имеют небольшой диапазон измерения, но независимо от пределов измерения имеют отметку  $0$  °С. При работе термометр погружается в контролируемую среду на всю длину контролируемого столбика.

Основным производителем стеклянных термометров в РФ является з-д «Термоприбор» (г. Клин). В табл. 4.1 приведены технические характеристики некоторых разновидностей стеклянных термометров.

## 4.2. Термометры манометрические и биметаллические

Принцип действия *манометрических термометров* основан на изменении давления газа, жидкости или насыщенного пара в замкнутом объеме в зависимости от температуры [12]. Эти термометры широко применяются во взрывоопасных производствах и выпускаются такими фирмами как «Орлекс» (г. Орел), ОАО «МаноТомь» (г. Томск), Wika, Jumo (Германия) и др. Конструктивно термометр состоит из термобаллона 1, погружаемого в контролируруемую среду, манометра 3 для измерения давления и соединяющего их капилляра 2 (рис. 4.3). Такие термометры используются для измерения температур от  $-200$  до  $600$  °С и выпускаются следующих разновидностей.

*Газовые манометрические термометры* применяются для измерения температур в интервале от  $-200$  до  $600$  °С. Нижний предел измерения выбирается из интервала от  $-200$  до  $200$  °С, верхний — из интервала от  $50$  до  $600$  °С, диапазон измерения находится в интервале от  $100$  до  $700$  °С. В качестве наполнителя используется гелий (при низких температурах), азот (при средних температурах) или аргон (при высоких температурах).

Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме описывается линейным уравнением

$$p_t = p_0(1 + \beta t), \quad (4.2)$$

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

Уравнение шкалы газового манометрического термометра будет также линейным:

$$p_t = p_n \frac{1 + \beta t}{1 + \beta t_n}, \quad (4.3)$$

где  $p_t$  и  $p_n$  — давление газа при температурах, соответствующих началу шкалы термометра  $t_n$  и измеряемой температуре  $t$ .

Реальное уравнение шкалы несколько отличается от линейного (4.3), однако это отклонение незначитель-

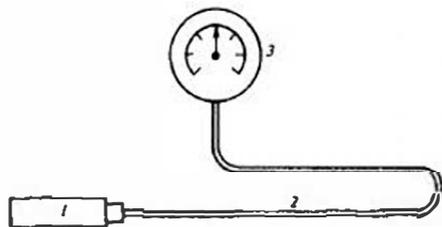


Рис. 4.3. Схема манометрического термометра:  
1 — термобаллон; 2 — капилляр; 3 — манометр

но и можно считать, что шкалы газовых манометрических термометров являются равномерными.

Изменение температуры окружающего воздуха влияет на расширение рабочего вещества в капилляре и манометрической пружине, что вызывает изменение давления в термосистеме и соответствующее изменение показаний термометра. Для уменьшения этого влияния уменьшают отношение внутреннего объема пружины и капилляра к объему термобаллона, для чего увеличивают длину термобаллона и его диаметр.

Класс точности газовых термометров 1 или 1,5. Они могут выпускаться показывающими или самопишущими, могут снабжаться дополнительными устройствами.

*Конденсационные манометрические термометры* используются для измерения температур в интервале от  $-25$  до  $300$  °С. Нижний предел измерения выбирается из интервала от  $-25$  до  $100$  °С, верхний — из интервала от  $35$  до  $300$  °С, диапазон измерения колеблется в пределах от  $50$  до  $150$  °С. Термобаллон термометра примерно на  $3/4$  заполнен жидкостью с низкой температурой кипения, а остальная часть заполнена насыщенным паром этой жидкости. Капилляр и манометрическая пружина также заполнены жидкостью. Количество жидкости в термобаллоне должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар. В качестве манометрических жидкостей используется фреон-22 (при низких температурах), метил хлористый, этил хлористый, ацетон, толуол, спирт (в порядке возрастания пределов измерения). Давление в термосистеме конденсационного манометрического термометра будет равно давлению насыщенного пара рабочей жидкости, определяемого, 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 однозначна, 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. Имеет место гидростатическая погрешность, вызываемая разностью высот расположения термобаллона и измерительного прибора. Для уменьшения этой погрешности длина капилляра не должна превышать  $25$  м. Барометрическая погрешность у конденсационных манометрических термометров может иметь место на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико. В остальных случаях влияние барометрического давления будет пренебрежимо мало.

Конденсационные термометры выпускаются показывающими, дополнительно они могут оснащаться электроконтактными устройствами. Класс термометров 1 или 1,5.

**Жидкостные манометрические термометры** находят небольшое распространение. Они используются для измерения температур в интервале от  $-50$  до  $300$  °С. Нижний предел измерения выбирается из интервала от  $-50$  до  $100$  °С, верхний — из интервала от  $50$  до  $300$  °С, диапазон измерения колеблется в пределах от  $50$  до  $300$  °С. В качестве термометрических жидкостей используется жидкость ПМС-5 при низких температурах, при высоких — жидкость ПМС-10. Рабочее вещество жидкостных манометрических термометров практически несжимаемо. Поэтому изменение объема рабочей жидкости в термобаллоне при изменении температуры соответственно диапазону измерения вызовет такое увеличение давления в термосистеме, при котором манометрическая пружина изменит свой внутренний объем соответственно изменению объема жидкости. При этом давление 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 различные способы температурной компенсации.

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. Жидкостные термометры выпускаются показывающими класса 1 или 1,5.

Манометрические термометры могут работать в условиях вибрации, а также во взрывоопасных и пожароопасных помещениях. Источники погрешностей термометров: изменение барометрического давления и температуры окружающей среды, характер взаимного расположения термобаллона и манометра. В табл. 4.2 приведены некоторые технические характеристики показывающих манометрических термометров ТГП-100М1 (газовые), ТКП-100М1 (конденсационные), ТЖП-100 (жидкостные). Для термометров ТКП-100М1 предельная основная погрешность устанавливается для последних двух третей температурной шкалы, а на первой трети не регламентируется. Для термометров с регламентированной погрешностью

Таблица 4.2

Технические характеристики манометрических термометров

Обозначение	Тип	Интервал применения °С	Класс	Диаметр термобаллона, мм	Длина термобаллона, мм	Глубина погружения термобаллона, мм	Длина капилляра, м
ТГП-100М1	Газовый	$-50 \dots 600$	1 или 1,5	20 или 30	125 250 400	От 160 до 500	От 1,6 до 60
ТКП-100М1	Конденсационный	$-25 \dots 300$	1 или 1,5	16	78	От 125 до 400	От 1,6 до 25
ТЖП-100	Жидкостной	$-50 \dots 300$	1 или 1,5	10	34 42 56 100	От 80 до 400	От 1,6 до 10

для первой трети устанавливается последующий низкий класс точности. Вариация показаний не превышает абсолютного значения предельной основной погрешности.

**Биметаллические термометры.** Принцип их действия основан на том, что полоска из двух свальцованных друг с другом пластин из металлов с различными коэффициентами расширения (биметалл), искривляется при изменении температуры.

Искривление находится в приблизительной пропорции с температурой. Биметаллическая пластина легла в основу двух различных измерительных элементов:

- винтовая пружина,
- спиральная пружина.

В результате механической деформации биметаллических пластин при изменении температуры в указанных элементах возникает вращательное движение. Если внешний конец биметаллической измерительной системы жестко закреплен, то другой конец без промежуточного элемента проворачивает вал указательной стрелки. Диапазоны показаний лежат между  $-70$  и  $600$  °С при измерениях с классом точности 1 или 2,5. Условное изображение термометра с винтовой пружиной приведено на рис. 4.4. Биметаллические тер-

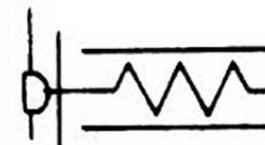


Рис. 4.4. Схема биметаллического термометра с винтовой пружиной

мометры являются наиболее простыми измерителями температуры. Они выпускаются НПО «Юмас» (Москва), ЗАО «Орлэкс» (г. Орел), ф. Wika (Германия) и др.

### Контрольные вопросы

1. Какие термометрические вещества используются для заполнения стеклянных термометров?
2. Чем отличаются методики измерения температуры стеклянными термометрами лабораторными и техническими?
3. Как вводится поправка на выступающий столбик?
4. Какие типы манометрических термометров вы знаете?
5. Какой тип манометрических термометров имеет наиболее широкий диапазон измерения?
6. Как влияют температура и давление окружающей среды на показания манометрических термометров?
7. Каков принцип действия биметаллических термометров?
8. Какие из рассмотренных в гл. 4 средств измерения температуры имеют более высокую точность измерения, а какие можно использовать для дистанционной передачи показаний?

## Глава пятая

### ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

#### 5.1. Общие сведения

Термопреобразователи сопротивления относятся к числу наиболее распространенных преобразователей температуры, используемых в целях измерения и регулирования [12, 17]. Термопреобразователи сопротивления выпускаются многими отечественными и зарубежными фирмами, такими как «Термико», «Элемер» (Московск. обл.), «Навигатор», «Термоавтоматика» (Москва), «Теплоприбор» (г. Владимир и г. Челябинск), Луцкий приборостроительный завод (Украина), Siemens, Jumo (Germany), Honeywell, Foxboro, Rosemount (USA), Yokogawa (Япония) и др.

Термометром сопротивления называется комплект для измерения температуры, включающий термопреобразователь, основанный на зависимости электрического сопротивления от температуры, и вторичный прибор, показывающий значение температуры в зависимости от измеряемого сопротивления. Для измерения температуры термопреобразователь сопротивления необходимо погрузить в контролируемую среду и каким-либо прибором измерить его сопротивление. По известной зависимости между сопротивлением термопреобразователя и температурой можно определить значение температуры. Таким образом, простейший комплект термометра сопротивления (рис. 5.1, а) состоит из термопреобразователя сопротивления (ТС), вторичного прибора (ВП) для измерения сопротивления и соедини-

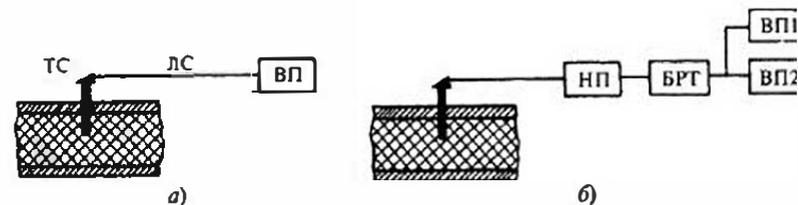


Рис. 5.1. Схемы термометров сопротивления:

а — термопреобразователь с вторичным прибором; б — термопреобразователь с нормирующим преобразователем; ТС — термопреобразователь сопротивления; ВП, ВП1, ВП2 — вторичные приборы; ЛС — линии связи; НП — нормирующий преобразователь; БРТ — блок размножения токового сигнала

тельной линии (ЛС) между ними (она может быть двух, трех или четырехпроводной). В качестве вторичного прибора обычно используются аналоговые или цифровые приборы (например, КСМ-2, РП-160, Технограф, РМТ-39/49), реже — логометры (например, Ш-69001). Шкалы вторичных приборов градуируются в градусах Цельсия.

Широко применяются схемы с нормированием выходного сигнала термопреобразователей (рис. 5.1, б). В этом случае линией связи ТС соединяется с нормирующим преобразователем НП (например, Ш-9321, ИПМ-0196 и т.п.), имеющим унифицированный выходной сигнал (например, 0...5 или 4...20 мА). Для использования в нескольких измерительных каналах этот сигнал размножается блоком размножения БРТ и затем поступает к нескольким вторичным приборам (ВП-1, ВП-2 и т.п.) или иным потребителям. Очевидно, что в этом случае вторичными приборами должны быть миллиамперметры. Выпускаются преобразователи сопротивления, в головке которых располагается схема нормирования, т.е. их выходным сигналом является ток 0...5, 4...20 мА или цифровой сигнал (интеллектуальные преобразователи). В таком случае необходимость использования нормирующего преобразователя НП в виде отдельного блока отпадает. Термопреобразователи сопротивления с выходным унифицированным сигналом имеют в своем обозначении букву У (например, ТСПУ, ТСМУ). Характеристики этих преобразователей и с цифровым выходным сигналом (Метран-286) приведены в табл. 5.1.

Для изготовления термопреобразователей сопротивления (ТС) могут использоваться либо чистые металлы, либо полупроводниковые материалы. Электрическое сопротивление чистых металлов увеличивается с ростом температуры (их температурный коэффициент достигает  $0,0065 \text{ K}^{-1}$ , т.е. сопротивление увеличивается на 0,65 % при увеличении температуры на один градус). Полупроводниковые ТС имеют отрицательный температурный коэффициент (т.е. их сопротивление уменьшается с ростом температуры), достигающий до  $0,15 \text{ K}^{-1}$ . Полупроводниковые ТС не используются в системах технологического контроля для измерения температуры, так как требуют периодической индивидуальной градуировки. Обычно они используются как индикаторы температуры в схемах компенсации температурной погрешности некоторых средств измерения (например, в схемах кондуктометров).

Термопреобразователи сопротивления из чистых металлов, получившие наибольшее распространение, изготавливают обычно из

Таблица 5.1

Технические данные термопреобразователей сопротивления

Тип ТС	Класс допуска	Интервал использования, °С	Пределы допускаемых отклонений $\pm \Delta t$ , °С
ТСМ	А	-50...120	$0,15 + 0,0015 \cdot  t $
	В	-200...200	$0,25 + 0,0035 \cdot  t $
	С	-200...200	$0,50 + 0,0065 \cdot  t $
ТСП	А	-200...650	$0,15 + 0,002 \cdot  t $
	В	-200...850	$0,30 + 0,005 \cdot  t $
	С	-100...300 и 850...1100	$0,60 + 0,008 \cdot  t $
ТСПУ	—	0...600	0,25; 0,5 % (приведенная)
ТСМУ	—	-50...180	0,25; 0,5 % (приведенная)
КТПТР	1	0...180 по $\Delta t$	$0,05 + 0,001 \Delta t$
	2		$0,10 + 0,002 \Delta t$
Метран 286 выход 4...20 мА HART протокол	—	0...500 (с 100П)	0,25 (цифровой сигнал) 0,3 (токавый сигнал)

тонкой проволоки в виде намотки на каркас или спирали внутри каркаса. Такое изделие называется чувствительным элементом ТС. Для предохранения от повреждений чувствительный элемент помещают в защитную арматуру. Достоинством металлических ТС является высокая точность измерения температуры (при невысоких температурах выше, чем у термоэлектрических преобразователей), а также взаимозаменяемость. Металлы для чувствительных элементов (ЧЭ) должны отвечать ряду требований, основными из которых являются требования стабильности градуировочной характеристики и воспроизводимости (т.е. возможности массового изготовления ЧЭ с одинаковыми в пределах допускаемой погрешности градуировочными характеристиками). Если хотя бы одно из этих требований не выполняется, материал не может быть использован для изготовления ТС. Желательно также выполнение дополнительных условий: высокий температурный коэффициент электрического сопротивления (что обеспечивает высокую чувствительность — приращение сопротивления на один градус), линейность градуировочной харак-

теристики  $R(t) = f(t)$ , большое удельное сопротивление, химическая инертность.

По ГОСТ Р50353-92 ТС могут изготавливаться из платины (обозначение ТСП), из меди (обозначение ТСМ) или никеля (обозначение ТСН). Характеристикой ТС является их сопротивление  $R_0$  при  $0^\circ\text{C}$ , температурный коэффициент сопротивления (ТКС) и класс. Температурный коэффициент электросопротивления при температуре  $t$  в общем виде определяется из выражения

$$\alpha = (dR_t/dt)/R_t, \quad (5.1)$$

где  $d$  — символ производной;  $R_t$  — сопротивление ТС при температуре  $t$ .

При линейной зависимости  $R_t = f(t)$  обычно используется значение  $\alpha$  при  $0^\circ\text{C}$   $\alpha = (dR_t/dt)/R_0$ , которое не будет зависеть от температуры, поскольку значение  $(dR_t/dt)$  одинаково при любой температуре ( $R_0$  — сопротивление ТС при  $0^\circ\text{C}$ ). В этом случае зависимость сопротивления  $R_t$  от температуры будет иметь вид:  $R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t)$ .

Наличие в металлах примесей уменьшает температурный коэффициент электросопротивления, поэтому металлы для ТС должны иметь нормированную чистоту. Поскольку ТКС может изменяться с изменением температуры, показателем степени чистоты выбрана величина  $W_{100}$  — отношение сопротивлений ТС при 100 и  $0^\circ\text{C}$ . Для ТСП  $W_{100} = 1,385$  или  $1,391$ , для ТСМ  $W_{100} = 1,426$  или  $1,428$ . Класс ТС определяет допустимые отклонения  $R_0$  и  $W_{100}$  от номинальных значений, что, в свою очередь, определяет допустимую абсолютную погрешность  $\Delta t$  преобразования ТС. По допустимым погрешностям ТС подразделяются на три класса — А, В, С, при этом платиновые ТС обычно выпускаются классов А, В, медные — классов В, С. Существует несколько стандартных разновидностей ТС. Номинальной статической характеристикой (НСХ) ТС является зависимость его сопротивления  $R_t$  от температуры  $t$

$$R_t = f(t).$$

Условное обозначение их номинальных статических характеристик (НСХ) состоит из двух элементов — цифры, соответствующей значению  $R_0$  и буквы, являющейся первой буквой названия материала (П — платина, М — медь, Н — никель). В международном обозначении перед значением  $R_0$  расположены латинские обозначения

Таблица 57

$t, ^\circ\text{C}$	Номинальные статические характеристики термопреобразователей сопротивления					
	ТС, $R_t$ , Ом			ТС, $R_t$ , Ом		
	$W_{100} = 1,3910$		$W_{100} = 1,4280$	$W_{100} = 1,3910$		$W_{100} = 1,4280$
	50П	100П	50М	100М	50П	100М
-240	1,35	2,70			166,55	333,10
-200	8,65	17,31	6,08	12,16	174,46	348,93
-160	17,27	34,55	14,81	29,62	182,23	364,47
-120	25,68	51,36	23,84	47,69	189,86	379,72
-80	33,97	67,81	32,71	65,42	197,33	394,67
-40	42,00	84,01	41,40	82,81	204,66	409,33
0	50,00	100,00	50,00	100,00	211,85	423,70
50	59,85	119,71	60,70	121,40	218,89	437,78
100	69,55	139,10	71,40	142,80	225,78	451,56
150	79,11	158,22	82,08	164,19	232,52	465,05
200	88,51	177,03	92,79	185,58		
250	97,77	195,55				
300	106,89	213,78				
350	115,85	231,71				
400	124,68	249,36				
450	133,35	266,71				
500	141,88	283,76				
550	150,25	300,51				
600	158,48	316,96				

материалов Pt, Cu, Ni. НСХ термопреобразователей сопротивления записывается в виде:

$$R_t = W_t \cdot R_0, \quad (5.2)$$

где  $R_t$  — сопротивление ТС при температуре  $t$ , Ом;  $W_t$  — значение отношения сопротивлений при температуре  $t$  к сопротивлению при  $0^\circ\text{C}$  ( $R_0$ ). Значения  $W_t$  выбираются из таблиц ГОСТ Р50353-92. Диапазоны применения ТС различных типов и классов, формулы расчета предельных погрешностей и НСХ приведены в табл. 5.1 и 5.2.

## 5.2. Разновидности и конструкция термопреобразователей сопротивления

*Платиновые термопреобразователи сопротивления* (ТСП) могут иметь следующие сопротивления при  $0^\circ\text{C}$ : 1, 5, 10, 50, 100 и 500 Ом, и поэтому имеют следующее обозначение номинальных статических характеристик 1П, 5П, 10П, 50П, 100П и 500П. ТСП используются для измерения температуры в интервале  $(-260 \dots 1100)^\circ\text{C}$  и являются наиболее распространенным типом ТС. При выборе ТСП следует использовать общий принцип — низкоомные ТС необходимо применять для измерения высоких температур, а высокоомные — для измерения низких температур.

Кроме того, при использовании высокоомных ТСП влияние изменения сопротивления внешней линии сказывается меньше, чем при использовании низкоомных. Недостатком платиновых ТС является нелинейность статической характеристики, особенно в области высоких и отрицательных температур, возможность загрязнения платины при высоких температурах, подверженность воздействию восстановительных и агрессивных газов. В интервале температур  $(0 \dots 600)^\circ\text{C}$  зависимость сопротивления от температуры описывается нелинейным выражением

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2). \quad (5.3)$$

Обычно в таблицах задаются значения  $W_t = R_t/R_0$  в зависимости от температуры. В этом случае номинальные статические характеристики преобразования рассчитываются по (5.2) и даны в табл. 5.2.

Для изготовления платиновых ТС используется проволока диаметром от 0,05 до 0,1 мм (для использования в температурном интервале до  $750^\circ\text{C}$ ) и диаметром (0,2...0,5) мм для измерения температур до  $1100^\circ\text{C}$ . Типовой конструкцией чувствительного элемента является конструкция, представленная на рис. 5.2. Чувствительный

элемент состоит из соединенных последовательно двух платиновых спиралей 1, расположенных в каналах керамического каркаса 2. Каналы каркаса со спиралью заполняются порошком 3 (обычно это оксид магния), который служит изолятором и улучшает тепловой контакт проволоки с каркасом. К концам спиралей припаяны короткие выводы 4 из платиновой или иридиевой проволоки, к которым затем припаяются изолированные выводные проводники. Торцы керамического каркаса герметизируются специальной глазурью 5. Каркас помещается в тонкостенную металлическую оболочку 6, которая также за-



Рис. 5.2. Чувствительный элемент платинового термопреобразователя: 1 — платиновые спирали; 2 — керамический каркас; 3 — изоляционный порошок; 4 — выводы; 5 — глазурь; 6 — металлическая оболочка

полняется порошком и закрывается пробкой, через которую пропущены выводы. Каркас может иметь четыре канала для размещения двух спиралей (двойные ТС). Такая конструкция обеспечивает хорошую герметичность чувствительного элемента, незначительное механическое напряжение платиновой проволоки, достаточную прочность и вибростойкость. Длина платиновых чувствительных элементов обычно равна 50...100 мм при диаметре 3...6 мм. Все свободное пространство заполнено изолирующим порошком. Предельные погрешности ТСП приведены в табл. 5.1.

*Медные термопреобразователи сопротивления* (ТСМ) применяются для длительного измерения температуры в интервале от  $-200$  до  $200^\circ\text{C}$ . К достоинствам меди как материала для чувствительных элементов следует отнести дешевизну, возможность получения в чистом виде, хорошую технологичность, линейность зависимости сопротивления  $R_t$  от температуры  $t$ . Статическая характеристика преобразования у ТСМ описывается уравнением  $R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t)$ , где  $\alpha$  — температурный коэффициент, равный  $0,00428^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $R_0$  — сопротивление ТСМ при  $0^\circ\text{C}$ .

Линейность статической характеристики является достоинством меди, а ее недостатком — интенсивная окисляемость, что ограничивает диапазон применения ТСМ температурой  $200^\circ\text{C}$  и требует покрытия изоляцией проволоки чувствительного элемента. Проволока может покрываться либо эмалью, либо кремнийорганической изоляцией. Чувствительный элемент медного ТС состоит из медной изолированной проволоки диаметром 0,1 мм, намотанной на каркас (рис. 5.3, а). Намотка должна быть безындуктивной, т.е. индуктив-

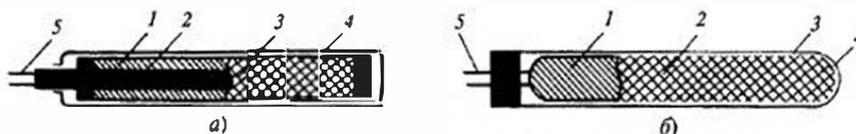


Рис. 5.3. Чувствительные элементы медных термопреобразователей: а — с каркасной намоткой: 1 — намотка; 2 — каркас; 3 — слой лака; 4 — защитная оболочка; 5 — выводы; б — с бескаркасной намоткой: 1 — намотка; 2 — фторопластовая оболочка; 3 — защитная оболочка; 4 — изолирующий порошок; 5 — выводы

ное сопротивление чувствительного элемента (ЧЭ) ТС должно быть минимальным. Это связано с тем, что ЧЭ содержит большое число витков медного провода и при обычной намотке будет иметь значительную индуктивность. Поскольку вторичные приборы для ТС (автоматические мосты) имеют измерительные схемы, питаемые электрическим переменным током, индуктивное сопротивление одного из плеч (в данном случае ЧЭ) будет влиять на режим уравновешивания. Для обеспечения безындуктивности обычно выполняется бифилярная намотка — намотка вдвое сложенным проводом. Поверхность намотки покрывается слоем лака. К концам проволоки припаиваются медные выводы диаметром 1...1,5 мм. ЧЭ помещается в металлическую защитную оболочку, засыпанную изолирующим порошком и герметизированную. Чувствительные элементы могут быть бескаркасными (рис. 5.3, б). Они изготавливаются из медной проволоки диаметром 0,08 мм безындуктивной намоткой. Отдельные слои скреплены лаком, а затем весь ЧЭ обернут фторопластовой пленкой. ЧЭ помещается в тонкостенную металлическую оболочку, которая засыпается изолирующим порошком и герметизируется.

Недостатком меди, как материала для ТС, является также малое удельное сопротивление, так как для изготовления ЧЭ при этом требуется много проволоки, что увеличивает размеры ЧЭ и ухудшает динамические свойства ТС.

По ГОСТ Р50353-92 медные термопреобразователи сопротивления (сокращенное обозначение ТСМ) должны иметь номинальное сопротивление при 0 °С, равное 10, 50, 100 Ом, при этом номинальные (т.е. идеальные) статические характеристики преобразования (НСХ) условно обозначаются 10М, 50М, 100М (таким образом, в обозначении НСХ цифра — это сопротивление ТС при 0 °С в омах, буква — обозначение материала — медь). Для всех разновидностей ТСМ аналитическое выражение НСХ одинаково:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t), \quad (5.4)$$

причем коэффициент  $\alpha = 0,00428$  (1/°С) одинаков для всех ТСМ (по стандартам МЭК он может быть равным 0,00426 1/°С). Различие НСХ только в значении  $R_0$ . Медные ТС обычно выпускаются с классами допуска В и С. Предельные значения отклонений приведены в табл. 5.1

В общем виде чувствительность для термопреобразователя сопротивления определяется выражением

$$S = \Delta R_t / \Delta t, \quad (5.5)$$

при  $\Delta t$  стремящемся к нулю

$$S = dR_t / dt, \quad (5.6)$$

где  $d$  — символ производной.

По табл. 5.1 погрешность ТС выражается в градусах ( $\Delta t$ ). Она может быть выражена в единицах сопротивления  $\Delta R$ , связанных с  $\Delta t$  (в градусах) через коэффициент преобразования:

$$\Delta R = \Delta t \cdot S. \quad (5.7)$$

Арматура ТС бывает двух исполнений: с головкой и без нее. В головке ТС имеются контакты, к которым подсоединяются выводные проводники от ЧЭ и сальниковый ввод для линии связи со вторичным устройством. Внутреннее устройство ТС с головкой представлено на рис. 5.4.

Чувствительные элементы помещаются в защитную арматуру, подобную изображенной на рис. 5.4. Выводные (от ЧЭ) проводники пропускаются через каналы керамического изолятора, все свободное пространство внутри арматуры засыпается керамическим порошком. В верхней части арматура герметизируется. В головке располагается сборка зажимов, к которой подсоединяются выводные про-

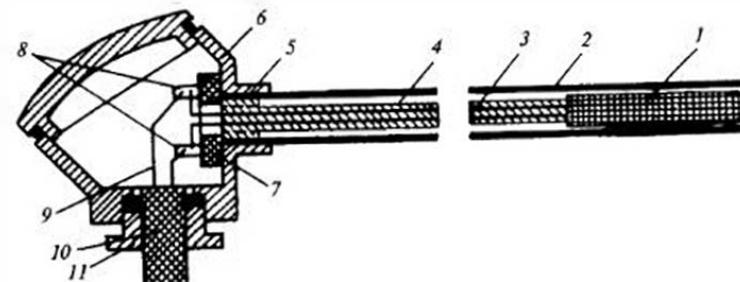


Рис. 5.4. Устройство термопреобразователя сопротивления с головкой и без крепежных деталей:

1 — чувствительный элемент; 2 — защитная арматура; 3 — выводы; 4 — изоляция; 5 — герметик; 6 — головка; 7 — клеммная сборка; 8 — зажимы; 9 — жила кабеля; 10 — кабель; 11 — гайка

водники чувствительного элемента и провода внешней линии. На внешней стороне арматуры может располагаться подвижный или неподвижный штуцер. На контролируемом объекте закрепляется защитная гильза, внутри которой закрепляется арматура ТС.

От чувствительного элемента к контактной головке могут подходить два, три или четыре выводных проводника. Это связано с различными схемами подключения ЧЭ к вторичным устройствам (двух-, трех- или четырехпроводные схемы). Часть применяемых схем выводов приведена на рис. 5.5.

Схема ТС без головки и крепежных устройств с четырьмя выводами от ТС изображена на рис. 5.6. У таких ТС выводы от чувствительного элемента после пробки, герметизирующей свободный конец защитной арматуры, выпускаются в виде отдельных изолированных проводов большой протяженности. На рис. 5.6 изображен пример, когда от чувствительного элемента отходят четыре вывода.

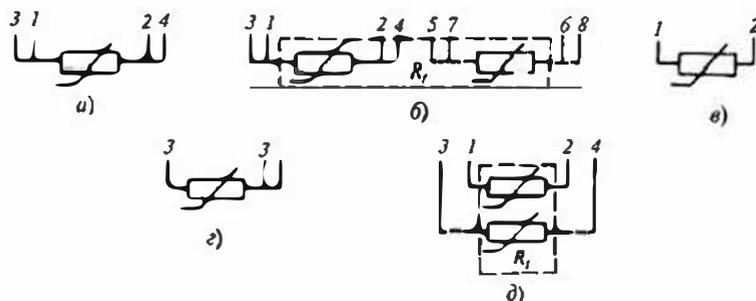


Рис. 5.5. Применяемые схемы выводов от чувствительного элемента термопреобразователя:

а, б — четырехпроводная; в, д — двухпроводная; в — трехпроводная (схемы б, д — двойной ТС)

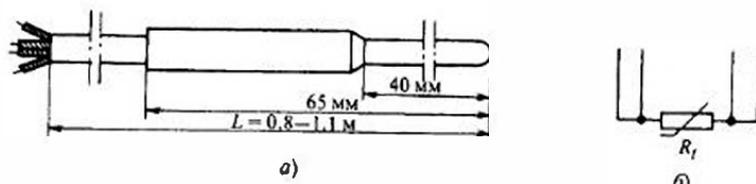


Рис. 5.6. Схема термопреобразователя сопротивления без головки с четырьмя выводами:

а — внешний вид; б — схема выводов

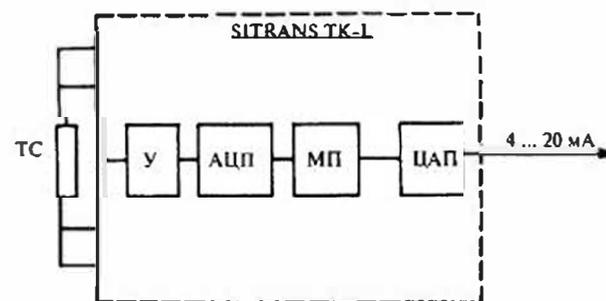


Рис. 5.7. Структурная схема измерительного преобразователя температуры SITRANS TK-L

Проволочные ТС имеют стабильную НСХ, однако обладают сравнительно большими размерами и достаточно большой тепловой инерцией. Этим недостаткам лишены тонкопленочные ТС, которые работают в интервале  $(-50...300)^\circ\text{C}$ , классов А, В, С и имеют НСХ 50М(П), 100М(П), 500М(П), 1000М(П).

Структурная схема измерительного преобразователя температуры SITRANS TK-L, размещаемого в головке термопреобразователя сопротивления ТС (Pt100) представлена на рис. 5.7. Последний к преобразователю подключен по четырехпроводной схеме, возможны варианты двухпроводного и трехпроводного подключения. Сигнал от ТС, усиленный в усилителе У, поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП, а затем на микропроцессор МП и цифроаналоговый преобразователь ЦАП. В микропроцессоре производится усреднение измеряемого сигнала, линеаризация, пересчет в соответствии с заданным диапазоном и пр. По двухпроводной линии передается выходной сигнал  $4...20\text{ мА}$  и питание от внешнего источника. Диапазон измерения преобразователя составляет  $-200...850^\circ\text{C}$  при погрешности  $\pm 0,1\%$  диапазона измерения. Фирма Siemens помимо этих преобразователей выпускает SITRANS ТЗК-РА, SITRANS ТК/ТК-Н, SITRANS ТФ. Первый тип преобразователей имеет цифровой интерфейс PROFIBUS-РА, два других при выходном сигнале  $4...20\text{ мА}$  работают с HART модемами, последний имеет, кроме того, встроенный цифровой индикатор.

**Комплекты термопреобразователей.** Платиновые термопреобразователи сопротивления являются основными средствами измерения температур в системах контроля теплоснабжения, где малые разности температур ( $3...4^\circ\text{C}$ ) должны измеряться с погрешностью ( $1...2\%$ ). Обычно для учета теплоты подбирается комплект из двух платиновых ТС (например, комплект КТПТР), обладающих близ-

кими погрешностями одного знака, это позволяет обеспечить высокую точность измерения разности температур. В табл. 5.1 приведены пределы допускаемых погрешностей измерения разности температур комплектами платиновых термопреобразователей классов 1 и 2, которые образованы соответственно термопреобразователями классов А и В.

*Полупроводниковые термопреобразователи* сопротивления обычно называются термисторами и используются для измерения температур в интервале  $(-100...300)$  °С. Их достоинства — высокое значение ТКС (на порядок больше, чем у металлов), малая тепловая инерция и высокое номинальное сопротивление. Недостатками являются нелинейность номинальной статической характеристики, взаимозаменяемость из-за большого разброса номинального сопротивления и ТКС, нестабильность статической характеристики. В связи с этими недостатками полупроводниковые термопреобразователи обычно используются в цепях температурной компенсации и сигнализации, где не предъявляются высокие требования к точности измерения температуры.

Таким образом, термопреобразователи сопротивления могут применяться для измерения температуры только в сочетании с другими средствами измерений. Так, измерительный комплект может состоять из ТС, вторичного прибора (например, РП160-12) и соединительной линии между ними. Погрешность измерения температуры в этом случае определяется погрешностью всех этих средств с учетом возможной методической погрешности.

### Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к материалу термопреобразователей сопротивления?
2. Из каких материалов выполняются металлические ТС?
3. Что обозначают градуировки 100П, Cu50?
4. В какой области температур используются платиновые и медные ТС?
5. Чем отличается конструктивное выполнение платиновых и медных ТС и чем оно вызвано?
6. Какие выходные сигналы имеют термопреобразователи ТСПУ и SITRANS ТК-L?
7. Каково назначение комплектов термопреобразователей КТППР?

## Глава шестая

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

#### 6.1. Теоретические основы измерения температуры термоэлектрическим методом

Термоэлектрические преобразователи, как и термопреобразователи сопротивления, являются наиболее распространенными средствами измерения температуры и выпускаются фирмами, перечисленными в гл. 5.

Термоэлектрический метод измерения температуры [12, 13] основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), развиваемой термопарой от температуры ее рабочего конца. ТермоЭДС возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников (электродов) А и В (рис. 6.1, а), если значения температуры мест соединения  $t$  и  $t_0$  не равны (при равенстве температур термоЭДС равна нулю). Возникающая в цепи термопары ЭДС является результатом действия эффектов Зеебека и Томпсона. Первый связан с появлением ЭДС в месте спая двух разнородных проводников, причем величина ЭДС зависит от температуры спая. Эффект Томпсона связан с возникновением ЭДС в однородном проводнике при наличии разности температур на его концах.

Развиваемая термоЭДС зависит от значения обеих температур  $t$  и  $t_0$ , причем она увеличивается с ростом разности  $(t - t_0)$ . В силу этого термоЭДС термопары условно обозначается символом  $E(t, t_0)$ . Оче-

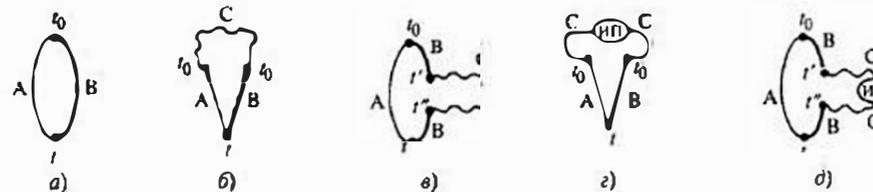


Рис. 6.1. Цепи термопар:

а — соединение двух проводников; б, в — варианты включения третьего проводника; г, д — варианты включения измерительного прибора ИП

видно, что температуру с помощью термопары можно измерить, если выполнить следующие условия:

- рабочий конец термопары поместить в контролируемую среду, а температуру другого спая (свободных концов) стабилизировать;
- измерить термоЭДС, развиваемую термопарой;
- иметь градуировочную характеристику  $E(t, t_0)$  термопары — зависимость термоЭДС от температуры рабочего конца (т.е. измеряемой температуры) при определенном значении  $t_0$ .

Для понимания дальнейшего материала обратимся к «теореме о третьем проводнике». Суть ее (без доказательства) следующая: включение в цепь термопары третьего проводника из любого материала «С» (на всех схемах он изображен волнистой линией) не вызывает искажения термоЭДС, если температуры мест присоединения этого проводника одинаковы. Поэтому термоЭДС, развиваемые в схемах (рис. 6.1, б, в), будут одинаковыми, если только будут равны между собой температуры  $t'$  и  $t''$ , т.е. при соблюдении условия  $t' = t''$ . На основании изложенного можно представить два способа включения измерительного прибора (ИП) в цепь термопары: в разрыв свободных концов (рис. 6.1, з) или в разрыв электрода (рис. 6.1, д).

Два любых разнородных проводника могут образовать термопару, но не любая термопара может использоваться для практических температурных измерений. К материалам для термопар (термоэлектродным материалам) предъявляется ряд требований: жаропрочность, химическая стабильность, воспроизводимость материалов (для обеспечения взаимозаменяемости термопар), заключающаяся в одинаковой зависимости термоЭДС термопары от температуры.

Теперь обратимся к терминологии. *Термопара* — это соединение двух разнородных проводников — электродов. Для практического использования термопары ее электроды должны быть изолированы и помещены в защитную арматуру. Такая конструкция называется термоэлектрическим преобразователем. По определению «термоэлектрический преобразователь» (ТЭП) — это термопреобразователь, действие которого основано на зависимости термоэлектродвижущей силы термопары от температуры.

Термопара является основным элементом средств измерения температуры — термоэлектрических преобразователей (ТЭП).

В соответствии с ГОСТ Р50431-92 в табл. 6.1 приведены пределы длительного (кратковременного) применения для различных ТЭП, имеющих следующие обозначения:

- ТВР(А) — вольфрамрений-вольфрамрениевые;  
ТПР(В) — платинородий-платинородиевые;

Таблица 6.1

Стандартные термоэлектрические преобразователи

Подгруппа ТЭП	Условное обозначение НСХ	Диапазон длительного (кратковременного) применения, °С	Коэффициент преобразования мВ/°С · 10 <sup>3</sup>
ТВР	ВР(А)-1 (А-1)	0...2200 (2500)	12,1...9,2
	ВР(А)-2 (А-2)	0...1800 (2500)	11,8...11,4
	ВР(А)-3 (А-3)	0...1800 (2500)	11,9...11,3
ТПР	ПР(В)	300...1600 (1800)	3,1...5,9
ТПП	ПП(С)	0...1300 (1600)	5,5...12,1
	ПП(Р)	0...1300 (1600)	5,4...14,1
ТХА	ХА(К)	-200...1000 (1300)	16,1...39,0
ТХК	ХК(Л)	-200...600 (800)	28,5...87,8
	ХК(Е)	-200...700 (900)	26,3...79,8
ТНН	НН(Н)	-270...1300 (1300)	0,9...36,2
ТМК	МК(Т)	-200...700 (900)	16,4...61,7
ТЖК	ЖК(Л)	-200...700 (900)	23,1...62,0

ТПП(С, Р) — платинородий-платиновые;

ТХА(К) — хромель-алюмелевые;

ТХК(Л) — хромель-копелевые;

ТХК(Е) — хромель-константановые;

ТНН(Н) — никросил-нисилые;

ТМК(Т) — медь-константановые;

ТЖК(Л) — железо-константановые.

Зависимость развиваемой термопреобразователем термоЭДС от температуры рабочего спая  $t$  при нулевой температуре свободных концов  $t_0 = 0$  °С (т.е.  $E(t, 0) = f(t)$ ) называется номинальной статической характеристикой преобразования (НСХ). Она задается в виде таблиц (градуировочных) или формул и обозначается условным символом в русском и международном обозначении.

В соответствии с ГОСТ Р50431-92 в настоящее время для обозначения НСХ должны использоваться только латинские буквы (приведены в скобках).

В обозначениях преобразователей первым указывается положительный электрод (например, у преобразователя ТХК положительный электрод — хромелевый, отрицательный — копелевый). На условных графических изображениях положительный электрод обозначается тонкой линией, отрицательный — толстой. При небольших диаметрах электродов верхний предел измерения может

быть уменьшен. Термопреобразователь ТПР (В) не развивает термоЭДС, если температура рабочего спая не превышает 300 °С (при температуре свободных концов 0 °С). Зависимости термоЭДС от температуры для термопар нелинейны, поэтому в пределах диапазона применения изменяется их коэффициент преобразования (чувствительность). В табл. 6.1 приведены округленные значения чувствительности в начале и конце диапазона применения.

Существуют другие разновидности термопреобразователей, статические характеристики которых могут быть не стандартизованы: например, сплав молибдена с рением МР 5/20, термопары на основе металлических материалов — графита и тугоплавких соединений (карбидов, нитридов и т.п.)

В табл. 6.2 и на рис. 6.2, а приведены статические характеристики термопар ХА, ХК, ПП. Из графиков видно, что наибольшую термоЭДС развивает термопара ХК, наименьшую (из этих трех) термо-

Таблица 6.2

Номинальные статические характеристики термоэлектрических преобразователей

t, °С	ТЭП, E, мВ			t, °С	ТЭП, E, мВ		
	ПП(S)	ХА(K)	ХК(L)		ПП(S)	ХА(K)	ХК(L)
-240		-6,344		650	5,751	27,022	53,484
-200		-5,892	-9,488	700	6,274	29,128	57,856
-160		-5,141	-8,207	750	6,805	31,214	62,200
-120		-4,138	-6,575	800	7,345	31,277	66,469
-80		-2,92	-4,431	850	7,892	35,314	
-40		-1,527	-2,500	900	8,448	37,325	
0	0,000	0,000	0,000	950	9,012	39,310	
50	0,299	2,022	3,306	1000	9,585	41,269	
100	0,645	4,095	6,860	1050	10,165	43,202	
150	1,029	6,137	10,621	1100	10,754	45,108	
200	1,440	8,137	14,557	1150	11,348	46,985	
250	1,873	10,151	18,639	1200	11,947	48,828	
300	2,323	12,207	22,839	1250	12,550	50,633	
350	2,786	14,292	27,132	1300	13,155	52,398	
400	3,260	16,395	31,488	1400	14,368		
450	3,743	18,513	35,882	1500	15,576		
500	4,234	20,640	40,292	1600	16,771		
550	4,732	22,772	44,700	1700	17,942		
600	5,237	24,902	49,098				

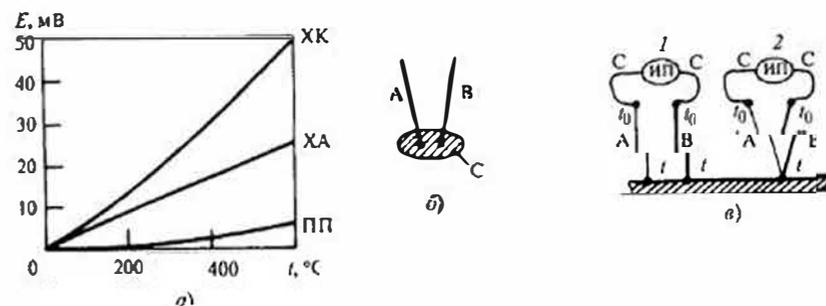


Рис. 6.2. Номинальные статические характеристики преобразователей (а), схема изготовления рабочего спая (б) и способы измерения температуры пластины (в)

пара ПП. Поэтому при невысоких температурах целесообразнее использовать термопреобразователи типа ТХК.

Наиболее линейная характеристика у термопар ХА. Наиболее точной из этих трех является термопара ПП. Отклонение реальной градуировочной характеристики от номинальной определяются классом ТЭП. Классы обозначаются цифрами 1, 2, 3 (в порядке увеличения погрешности), причем внутри класса погрешность может зависеть от измеряемой температуры (табл. 6.3).

Коэффициентом преобразования (чувствительностью) термопары называется отношение изменения термоЭДС, вызванного изменением температуры рабочего конца к значению этого изменения  $S = \Delta E / \Delta t$  (мВ/град) при небольших значениях  $\Delta t$ .

Для получения численных значений измеряемой температуры к термопреобразователю необходимо подключить показывающий прибор, измеряющий термоЭДС термопары (вторичный прибор), шкала которого должна быть в градусах. Такое соединение называется термоэлектрическим термометром. В дальнейшем будут использоваться все эти термины. Чтобы температурная шкала вторичного прибора была равномерной, желательно, чтобы коэффициент преобразования термопары (преобразователя)  $S$  не зависел бы от измеряемой температуры  $t$  в пределах диапазона измерения, в противном случае возникает необходимость в применении линеаризации. При оценке зависимости  $S = f(t)$  температурный интервал  $\Delta t$  в выражении  $S = \Delta E / \Delta t$  следует брать возможно малым — теоретически нужно использовать производную  $S = dE/dt$ .

Вернемся к «теореме о третьем проводнике» — включение в цепь термопары «АВ» третьего проводника «С» из любого материала не вызовет искажений термоЭДС, если температуры мест присоеди-

Таблица 6.3

Пределы допускаемых отклонений для температуры  $t$ 

Подгруппа ТП	Класс точности	Диапазон измеряемых температур, °С	Предел допускаемых отклонений $\pm \Delta t$ , °С
ТМК(Т)	3	-200...-66	0,015 ·  t
		-66...40	1,0
	2	-40...135	1,0
		135...400	0,0075 ·  t
1	-40...125	0,5	
	125...350	0,004 ·  t	
ВР(А)	3	1000...2550	0,007 ·  t
	2	1000...2550	0,005 ·  t
ТПР(В)	3	600...800	4,0
		800...1800	0,005 ·  t
ТПП(С, R)	2	600...1800	0,0025 ·  t
		0...600	1,5
	1	600...1600	0,0025 ·  t
		0...1100	1,0
		1100...1600	1,0 + 0,003(t - 1100)
ТХА(К) ТНН(М)	3	-250...-166,7	0,015 ·  t
		-166,7...40	2,5
1	2	-40...333,4	2,5
		333,4...1350	0,0075 ·  t
	1	-40...375	0,5
		375...1350	0,004 ·  t
ТХК(Л)	3	-200...-100	0,015 ·  t
		-100...100	2,5
	2	-40...300	2,5
		300...800	0,7 + 0,005 ·  t
ТХК(Е)	3	-200...-166,7	0,015 ·  t
		-166,7...-40	2,5
	2	-40...333,4	2,5
		333,4...900	0,0075 ·  t
1	-40...375	1,5	
	375...800	0,004 ·  t	
ТЖК(Л)	2	-40...333,4	2,5
		333,4...900	0,0075 ·  t
	1	-40...375	1,5
		375...750	0,004 ·  t
ТХАУ 4...20 мА		0...1000	0,5; 1 % (приведенная)
Метран 281 выход 4...20 мА. HART протокол		n 1000	0,75 % по аналоговому сигналу 0,5 % по цифро- вому (приведенные)

ния этого проводника одинаковы. Из этой теоремы вытекает ряд важных практических положений. Рабочий спай термопары может быть образован сваркой любым материалом, если только температура во всех точках сварного слоя будет одинаковой (рис. 6.2, б).

Теорема о третьем проводнике имеет ряд практических выводов (рис. 6.2, в). Температуру массивного металлического бруска можно измерить по схеме 1 — прикрепив к металлу каждый электрод в отдельности, если температура во всех точках поверхности бруска одинакова, или по схеме 2 — прикрепив к металлу рабочий спай термопары.

ТермоЭДС термопары  $E(t, t_0)$  зависит от температуры рабочего  $t$  и свободных  $t_0$  концов термопреобразователя. Поэтому, чтобы отградуировать шкалу вторичного прибора в единицах температуры, необходимо задаться каким-то определенным значением  $t_0$ . Например, для автоматических потенциометров задаются расчетным значением  $t_0 = 20$  °С, для милливольтметров  $t_0 = 0$  °С. Номинальные статические характеристики задаются при  $t_0 = 0$  °С, поэтому в дальнейшем примем в качестве исходной  $t_0 = 0$  °С. Что делать, если реальное значение  $t_0$  отличается от нуля? Предположим  $t_0 > 0$  °С. Существует общая формула учета зависимости термоЭДС от значения  $t_0$ :

$$E(t, t_0) = E(t, 0) - E(t_0, 0),$$

т.е. при  $t_0 > 0$  °С термоЭДС термопары уменьшается на значение, равное значению термоЭДС, которое развивает термопара при температуре рабочих концов  $t_0$  и температуре свободных концов 0 °С.

Таким образом, если при известном значении  $t_0$ , известна (например, измеряется прибором) развиваемая термопарой термоЭДС  $E(t, t_0)$ , то порядок использования номинальной статической характеристики для определения значения  $t$  следующий (рис. 6.3, а):

- находится значение  $E(t_0, 0)$  (по нижней штриховой линии);
- прибавить к  $E(t_0, 0)$  измеренное значение  $E(t, t_0)$ ;
- суммарная ордината соответствует  $E(t, 0)$ , по которой можно определить  $t$  (верхняя штриховая линия).

Каким образом практически вводится поправка на отличие температуры свободных концов от нуля? Если значение  $t_0$  постоянно, то такую поправку можно ввести простым смещением указателя вторичного прибора. Но в реальных условиях  $t_0$  — это температура концов термопары, находящихся вне контролируемого объекта, при температуре окружающей среды, которая изменяется. В таком слу-

чае поправка вводится автоматическим устройством, выполненным либо в виде отдельного блока, либо встроенным в измерительную схему прибора. Чтобы измерять температуры свободных концов автоматические компенсаторы содержат термочувствительный элемент, температура которого равна  $t_0$ . Для обеспечения этого компенсатор располагается рядом со свободными концами термопреобразователя.

Теперь представим ситуацию: температура в трубе измеряется термопреобразователем длиной 1 м (т.е. длина электродов термопары 1 м), причем головка термопреобразователя (и концы электродов термопары) имеет температуру 60 °С. Компенсатор встроен во вторичный прибор, где температура 20 °С. В данном случае компенсатор вырабатывает напряжение  $U = E(20)$  (поскольку его термочувствительный элемент имеет температуру 20 °С), а поправку нужно вводить на 60 °С, т.е. иметь  $U = E(60)$ . Что делать? В этом случае термопреобразователь необходимо подключать к компенсатору специальными проводами, называемыми термоэлектродными удлиняющими проводами (ТЭ-проводами). По своим свойствам ТЭ-провода должны быть термондентичными удлиняемым электродам, т.е. каждый электрод должен удлиняться своим проводом.

Таким образом, подключение к ТЭП удлиняющих проводов аналогично удлинению электродов, т.е. концы ТЭ-проводов становятся свободными, и их температура — той температурой  $t_0$  свободных концов, которая определяет действующую в цепи ЭДС  $E(t, t_0)$ .

Если к электродам подключены два одинаковых монтажных провода, то температурой свободных концов будет температура концов электродов термопары. Например, если на участке I (рис. 6.3, б) проложить удлиняющие провода, то температура свободных концов

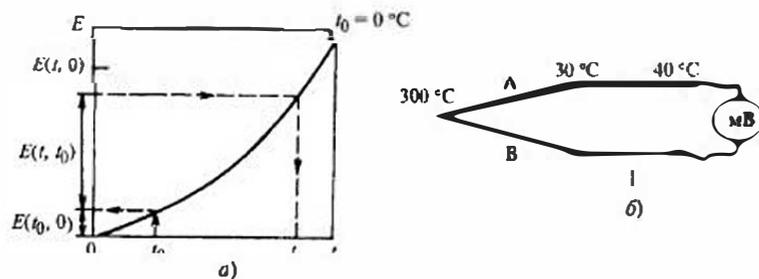


Рис. 6.3. График введения поправки на изменение температуры свободных концов (а) и схемы цепи термопары (б)

будет равной 40 °С, если на участке I будут проложены два одинаковых монтажных провода, то температура свободных концов будет равной 30 °С.

Но что означает идентичность? Все ясно, если, например, у преобразователя ТХК хромелевый электрод удлинить проводом из хромеля, а копелевый —

проводом из копеля. В этом случае по сути тем же материалом наращиваются электроды, т.е. удлиняется термопара. Но возможен и другой подход, в соответствии с которым: пара проводов может быть использована для удлинения термопары, если в паре между собой они имеют такую же градуировочную характеристику, что и удлиняемая термопара (в диапазоне возможного изменения температуры мест соединения). На рис. 6.4 изображена номинальная статическая (градуировочная) характеристика термопары ХА и аналогичные характеристики двух других термопар. Одна из них медь-константан (М) и другая — (МТ-НМ) составлена из электродов «медь + титан» — «никель + медь». У первой из них градуировочная характеристика совпадает с характеристикой термопары ХА в диапазоне (0...100) °С, а затем они расходятся. В соответствии с правилом пара проводов «медь + константан» (условное обозначение М) может быть использована в качестве удлиняющих для термопары ХА, если температура мест соединения не будет превышать 100 °С. При этом медным проводом удлиняется хромелевый электрод, а константановым — алюмелевый. Пара проводов МТ-НМ также используется в качестве удлиняющих, но температурный диапазон (температура мест присоединения) применения расширяется до 300 °С.

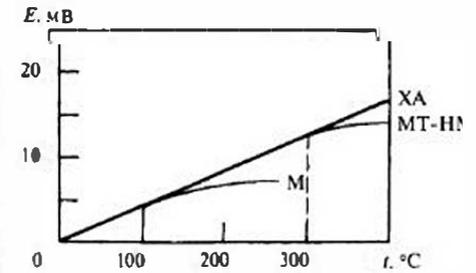


Рис. 6.4. Характеристики термоэлектродных удлиняющих проводов

При использовании удлиняющих проводов очень важно соблюдать правило подключения (полярность подключения). Например, нельзя хромелевый электрод удлинять константановым, а алюмелевый медным.

Из-за неполного совпадения градуировочных характеристик термопары и удлиняющих ее проводов возникает дополнительная погрешность (табл. 6.4). Эту погрешность следует учитывать при оценке общей погрешности измерения температуры.

Таблица 6.4

## Характеристика удлиняющих проводов

НСХ ТЭП	Наименование пары жил	Обозначение	Максимальная рабочая температура, °С	Погрешность °С
ХА(К)	медь-константан	М	100	5,5
ХЛ(К)	медь-титан/ медь-никель	МТ-НМ	300	4,9
ХК(Л)	хромель/копель	ХК	100	3,3
ПП(Р)	медь/сплав ТП	П	100	2,4
МК(М)	медь/копель	МК	100	3,3
ВР(А)	медь/медь-никель	М-МН	100	4,2

Примечание. Термопреобразователи ПР применяются без удлиняющих проводов.

Необходимость применения удлиняющих проводов отпадает при использовании термопар со встроенным в головку нормирующим преобразователем, в котором вводится поправка на изменение температуры свободных концов термопары и создается на выходе унифицированный токовый или цифровой сигналы. К таким преобразователям относятся ТХАУ, Метран 281 (интеллектуальный), в последнем используется термопара ТХА. Характеристики этих термопреобразователей приведены в табл. 6.3. С рассмотренными в § 5.2 преобразователями температуры SITRANS T работают и термоэлектрические преобразователи. Компенсация влияния температуры свободных концов может быть с внутренним сенсором Pt100 и внешней. Допускается подключение двух термопар для вычисления разности температур или с целью резервирования. При использовании различных термопар измерения производятся в диапазоне температур от  $-200$  до  $2300$  °С с погрешностью  $\pm(1...3)$  °С.

## 6.2. Конструкция термоэлектрических преобразователей

Условно термоэлектрические преобразователи подразделяются на термопреобразователи общепромышленного назначения и специальные. Термоэлектрический преобразователь — это термопара с изолированными электродами, помещенными в защитную арматуру. Рассмотрим вначале первую группу. Существует большое разнообразие конструктивных исполнений преобразователей. На рис. 6.5 представлена схема устройства одной из разновидностей преобразователя общепромышленного назначения. Электроды 1 термопреобразователей ТХК и ТХА общепромышленного назначения обычно

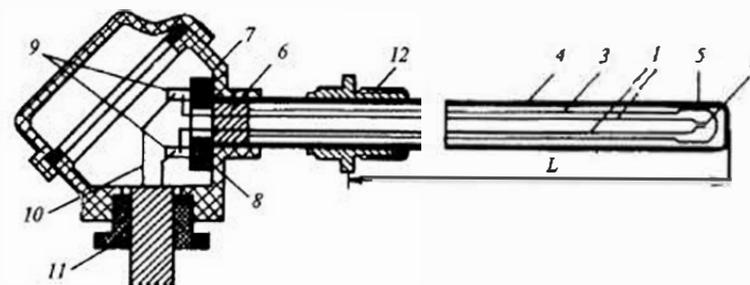


Рис. 6.5. Конструкция термоэлектрического преобразователя общепромышленного назначения:

1 — электроды; 2 — рабочий пай; 3 — трубка; 4 — защитная арматура; 5 — керамический наконечник; 6 — заливка; 7 — головка; 8 — сборка; 9 — зажимы; 10 — удлиняющие провода; 11 — герметизированный ввод; 12 — элементы крепления термопреобразователя

выполняются из проволоки диаметром, обеспечивающим пренебрежимо малое сопротивление термопары и достаточную механическую прочность. При этом можно не учитывать изменение сопротивления электродов при изменении температуры, что важно при использовании некоторых типов милливольтметров в качестве вторичных приборов. Рабочий спай 2 обычно выполняется сваркой.

Для изоляции термоэлектродов используют кварцевые (до  $1000$  °С) или фарфоровые (до  $1400$  °С) трубки или бусы. При более высоких температурах применяются оксиды металлов: алюминия, магния, бериллия и т.п. На рис. 6.5 в качестве изолятора изображена трубка 3, представляющая стержень с двумя продольными отверстиями, в которые пропущены электроды. Рабочий спай может быть защищен керамическим наконечником 5. Материалом защитной арматуры 4 обычно является нержавеющая сталь (до  $900$  °С), при высоких температурах используются специальные сплавы. Арматура заканчивается головкой 7, в которой расположена сборка 8 с зажимами 9, к которым подведены электроды термопары и через герметизированный ввод 11 — термоэлектродные удлиняющие провода 10. Внутренняя полость защитной арматуры может быть герметизирована заливкой 6 верхней части. На наружной поверхности арматуры могут располагаться элементы 12 (например, штуцера) для крепления защитной арматуры к объекту. Защитная арматура может не иметь штуцера, либо штуцер может быть подвижным (при невысоких давлениях контролируемой среды). Длина монтажной части  $L$  различных модификаций составляет  $(0,08...2,5)$  м, диаметр рабочей части  $(5...25)$  мм.

Конструкция, в которой рабочий спай изолирован от защитной арматуры, представлена на рис. 6.5. Существуют конструкции, в которых рабочий спай приварен к чехлу или прижат к нему. Это снижает инерционность преобразователя, но резко уменьшает помехозащищенность измерительного канала, особенно при заземлении какой-либо точки входного элемента потенциометра. Это вызвано тем, что рабочий спай через свою арматуру и защитный чехол оказывается заземленным, причем в другой точке, чем заземление измерительного прибора. В этом случае образуется паразитный контур и при различии потенциалов точек заземления на входе вторичного прибора появляется паразитный сигнал, не устраняемый входным фильтром. В силу этого целесообразно применять преобразователи с изолированным рабочим спаем.

Специальные термопреобразователи изготавливаются на основе кабельных термопреобразователей типов КТХАС, КТХАСП, КТХКС. Они предназначены для измерения температуры от  $-50$  до  $1000$  °С и в основном используются в реакторной термометрии [18]. Кабельные термопреобразователи имеют наружный диаметр от 1 до 6 мм, длину от 10 до 50 м с числом жил 2 или 4 (одна жила или одна пара жил из хромеля, другая из копеля или алюминия). Схематично устройство кабельного термопреобразователя с изолированным рабочим спаем представлено на рис. 6.6, а. Возможна конструкция термопреобразователей, у которых рабочий спай не изолирован от оболочки.

В кабельных преобразователях изоляция термоэлектродов осуществляется спрессованным порошком оксида магния. Существенным ее недостатком является гигроскопичность, причем с повышением влажности она набухает (может разорвать оболочку) и теряет изоляционные качества. Поэтому герметизация концов термопреобразователя с последующей проверкой ее качества обязательна. Материал оболочки — нержавеющая сталь. При малых диаметрах

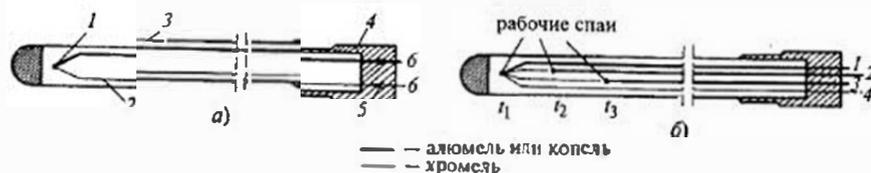


Рис. 6.6. Конструкция термоэлектрического преобразователя специального применения:

а, б — одно- и многозонный преобразователи; 1 — рабочий спай; 2 — термоэлектроды; 3 — оболочка; 4 — втулка; 5 — герметик; 6 — выводы

термопреобразователя электроды оказываются очень тонкими (до 0,2 мм) и с большим погонным сопротивлением. Для повышения прочности и уменьшения сопротивления измерительной цепи во втулке 4 они наращиваются более толстыми проводниками того же материала, которые и являются выводами. Существуют преобразователи с утонченным или плоским рабочим участком.

В качестве изолятора может быть использован оксид алюминия, обладающий хорошими изоляционными свойствами до  $1200$  °С, радиационно стойкий, подобно оксиду магния, он также гигроскопичен (хотя не набухает при увлажнении). Его недостаток — твердость зерен, что не обеспечивает плотной упаковки и соответственно высокой изоляции. Для измерения температур до  $2000$  °С может быть использован оксид бериллия, недостаток которого — токсичность.

Специфические (наряду с общими) требования предъявляются к материалам оболочек термопреобразователей для реакторных измерений: минимальное сечение поглощения нейтронов, минимальная наведенная активность, высокая радиационная стойкость, высокая коррозионная стойкость и технологичность. В качестве материала применяются стали с большим содержанием никеля. При изготовлении термопреобразователей важно следить за качеством изоляции электродов между собой и от оболочки. Наличие трещин или газовых полостей в изоляции приведет к понижению сопротивления под действием излучения и появлению ионизационных токов. Поэтому обязательной является процедура проверки герметичности оболочки и измерения сопротивления изоляции. По существующим нормам сопротивление должно быть не менее  $1000$  МОм.

Для измерения температуры в нескольких точках могут использоваться кабельные многозонные термопреобразователи (рис. 6.6, б). Такой преобразователь (ТЭП) имеет три или пять рабочих спаев при расстоянии между ними 1 или 1,5 м при общей длине 25 м и внешнем диаметре оболочки 3 или 6 мм. Число выводов ТЭП соответственно равно 4 или 6. Из рис. 6.6, б видно, что для измерения температуры в точке  $t_1$  прибор нужно подключить к выводам 1 и 4, а для измерения в точке  $t_3$  — к выводам 3 и 4. Все материалы и элементы многозонного ТЭП аналогичны однозонному (рис. 6.6, а). Достоинства такого ТЭП очевидны — возможность измерения температуры в нескольких точках в труднодоступных местах благодаря большой протяженности и малому диаметру при малом количестве металла, вводимого в контролируемую зону.

Удлиняющие термоэлектродные провода обычно изготавливаются в виде пары изолированных проводов сечением  $(0,2 \dots 4)$  мм<sup>2</sup>

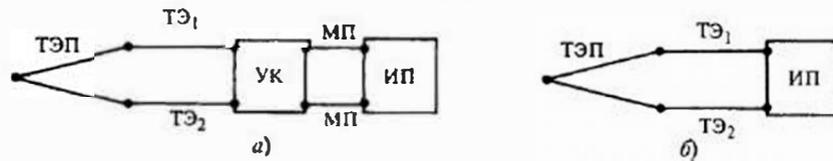


Рис. 6.7. Схемы измерительного комплекта с размещением свободных концов в УК (а) и в ИП (б)

в общей оболочке. Материал изоляции проводов и оболочки определяется условиями прокладки. Для целей помехозащищенности выпускаются провода, экранированные металлической оплеткой. Учитывая, что каждый провод удлиняющих проводов должен подключаться к определенному электроду термопреобразователя, изоляция проводов или цветные нити в оплетках имеют определенную расцветку.

Итак, можно уже представить из чего должен состоять измерительный комплект для измерения температуры термоэлектрическим методом (рис. 6.7, а): термоэлектрический преобразователь (ТЭП), компенсационное устройство (УК) для автоматического введения поправки на изменение температуры свободных концов преобразователя, удлиняющих термоэлектродных проводов ТЭ<sub>1</sub> и ТЭ<sub>2</sub> между ТЭП и УК (чтобы свободные концы оказались на зажимах УК) и измерительного прибора (ИП). Между УК и ИП соединительная линия выполняется одинаковыми монтажными (медными) проводами (МП). Обычно введение поправки на изменение температуры свободных концов осуществляется схемой самого прибора ИП. В этом случае отдельный блок УК не применяется, и ТЭП подключается непосредственно к ИП удлиняющими термоэлектродными проводами (рис. 6.7, б). Целиком измерительный комплект называется термоэлектрическим термометром. При применении длинных термопреобразователей (кабельных), их концы могут непосредственно соединяться с зажимами УК или ИП без использования удлиняющих термоэлектродных проводов.

### 6.3. Компенсационные устройства

Компенсационные устройства предназначены для автоматической компенсации влияния изменения температуры свободных концов ТЭП на показания вторичных приборов или выходной сигнал нормирующего преобразователя. Основной схемой устройства является четырехплечий неуравновешенный мост, питаемый источником постоянного (по роду тока) напряжения (рис. 6.8, а). Мост состоит

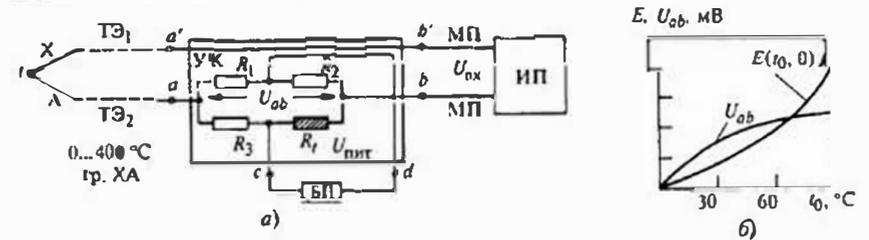


Рис. 6.8. Упрощенная схема мостового компенсатора (а) и график зависимости  $E(t_0, 0)$  (б)

из трех резисторов постоянного сопротивления  $R_1, R_2, R_3$ . Четвертый резистор  $R_t$  изготовлен из медной или платиновой проволоки, его сопротивление увеличивается с ростом температуры. Этот резистор всегда должен иметь температуру свободных концов, поэтому термопреобразователь, например ХА, подключается к компенсатору удлиняющими проводами ТЭ<sub>1</sub>, ТЭ<sub>2</sub> (если термопреобразователь длинный, он подключается к УК непосредственно). Сама мостовая схема включается в линию только одного провода (на схеме — рис. 6.8, а между зажимами а и б), вторая пара зажимов а'—б' соединяется перемычкой). Между компенсатором и измерительным прибором прокладываются одинаковые монтажные провода. Питание мостовой схемы осуществляется от блока питания (БП). На рис. 6.8, а представлен простейший вариант компенсатора для случая, когда нижний предел измерения ИП равен 0 °С.

Принцип компенсации заключается в том, что между точками а и б мостовой схемы должно вырабатываться напряжение  $U_{ab}$ , численно равное убыли ЭДС  $E(t_0, 0)$  при  $t_0 > 0$ :  $U_{ab} = E(t_0, 0)$  при упрощенном условии, что мост должен быть сбалансирован при  $t_0 = 0$  °С. Это напряжение должно алгебраически суммироваться с ЭДС термопары, поэтому на входе ИП будет действовать суммарное напряжение  $U_{вх}$ :

$$U_{вх} = E(t, t_0) + U_{ab} = E(t, t_0) + E(t_0, 0) = E(t, 0).$$

Очевидно требование к компенсатору: напряжение  $U_{ab}$  должно изменяться при изменении  $t_0$ , причем при любой  $t_0$  должно выполняться условие  $U_{ab} = E(t_0, 0)$ .

При анализе схем, содержащих мостовой компенсатор, важно следить за полярностью термоЭДС и компенсирующего напряжения  $U_{ab}$ . Используя общее выражение:

$$U_{вх} = E(t, t_0) + U_{ab},$$

следует помнить:

- в правильно работающем компенсаторе  $U_{ab}$  должно быть равно  $E(t_0, 0)$  при любом  $t_0$ ;
- в правильно собранной схеме входное напряжение прибора  $U_{вх}$  должно быть равно  $E(t, 0)$ .

Для мостовой схемы при нулевом внутреннем сопротивлении источника и бесконечно большом сопротивлении нагрузки:

$$U_{ab} = U_{пит} \frac{R_1 R_1 - R_2 R_3}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_1)}. \quad (6.1)$$

При нулевом значении  $t_0$  поправку вводить не нужно, т.е.  $U_{ab}$  должно быть нулевым и мост уравновешен. Для этого нулевым должен быть числитель (6.1), т.е. должно выполняться условие равновесия моста

$$R_1 R_1 = R_2 R_3.$$

С ростом  $t_0$  при постоянных  $R_1, R_2, R_3$  увеличивается  $R_1$  и растет  $U_{ab}$ .

Рассмотрим погрешность введения поправки. Для точного введения поправки необходимо обеспечение точного равенства  $U_{ab} = E(t_0, 0)$  при любом значении  $t_0$  в диапазоне ее изменения. Оказывается, что в действительности это условие обеспечить трудно (рис. 6.8, б). На рисунке представлен график зависимости  $E(t_0, 0) = f(t_0)$  — это по сути участок градуировочной характеристики термопары в диапазоне возможного изменения  $t_0$ . Здесь же изображена зависимость  $U_{ab} = f(t_0)$ , определяемая (6.1).

Кривые имеют разную форму, поэтому равенство  $U_{ab} = E(t_0, 0)$  при любом значении  $t_0$  обеспечить нельзя, а значит появится погрешность температурной компенсации. Эта погрешность в градусах при температуре  $t_0$  может быть подсчитана по формуле

$$\Delta = \frac{U_{ab} - E(t_0, 0)}{S},$$

где  $S$  — коэффициент преобразования термопары при температуре рабочего конца  $t_0$ .

При использовании потенциометра для измерения напряжения его схема не должна содержать медного резистора для введения поправки на температуру свободных концов ТЭП.

Существует несколько разновидностей компенсационных устройств. В комплекте с регуляторами используется коробка холодных спаев КХС, в комплекте с узкопрофильными милливольтметрами — устройства типа КТ, на АЭС — типа УКМ. Применение находят также соединительные коробки. Коробки представляют собой полые металлические цилиндры — тепловые экраны, внутрь которых вводятся концы электродов ТЭП (удлиняющие провода не используются). Тепловые экраны стабилизируют температуру свободных концов на каком-то значении. Внутри экранов рядом со свободными концами располагаются платиновые термопреобразователи сопротивления, позволяющие измерять температуру свободных концов с погрешностью  $(0,1 \dots 0,2)^\circ\text{C}$ . Сигналы от них заводятся в вычислительное устройство для обработки. До настоящего времени выпускались соединительные коробки КС-545, КС-513М, УК82-01.

Возникает вопрос — чем различаются компенсаторы для разных типов преобразователей, например ТХК и ТХА? Для этого нужно оценить различие градуировочных характеристик термопар ХК и ХА. У термопар ХК коэффициент преобразования больше, чем у ХА, а следовательно, компенсирующий мост в первом случае ХК должен вырабатывать напряжение  $U_{ab}$  больше, чем мост во втором — при одинаковых температурах свободных концов  $t_0$ . Изменение напряжения  $U_{ab}$  в соответствии с (6.1) осуществляется за счет изменения напряжения питания.

*Кварцевые термопреобразователи* используются для преобразования температуры в частотный сигнал. Чувствительным элементом преобразователей является кварцевый резонатор, частота колебаний которого определяется его температурой. Зависимость связывающая измеряемую температуру  $t$  с частотой  $f$ , имеет вид

$$t = t_0 + k_1(f - f_0) + k_2(f - f_0)^2 + k_3(f - f_0)^3,$$

где  $t_0, f_0$  — опорные значения температуры и частоты;  $k_1, k_2, k_3$  — константы, определяемые при градуировке преобразователя.

В рабочем диапазоне температур частота меняется в пределах от 100 до 1 кГц. Преобразователи ПТЧК в диапазоне температур  $0 \dots 150^\circ\text{C}$  имеют погрешность, не превышающую  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , в диапазоне до  $200^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$ . С этими термопреобразователями комплектуются некоторые типы теплосчетчиков.

#### 6.4. Методика определения температуры контактными средствами измерений

Условием правильного измерения температуры является равенство температур термопреобразователя и измеряемой среды или измеряемого тела. 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 термопреобразователя от температуры измеряемой среды, т.е. оценить погрешность измерения. В общем случае, если имеет место теплообмен между термопреобразователем и окружающей средой или другими частями технологического оборудования, собственная температура термопреобразователя не будет равна температуре измеряемой среды. Эта погрешность зависит от конструкции термопреобразователя и особенностей его установки на объекте измерения, от условий теплообмена термопреобразователя с измеряемой и окружающей средой, от режима работы оборудования или постоянства измеряемых параметров.

Влияние тех или иных факторов определяется конкретным методом измерения. В установившемся режиме, когда имеет место тепловое равновесие, термопреобразователь 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 термопреобразователя и условиями теплообмена с измеряемой средой.

##### *Погрешности, обусловленные теплообменом за счет теплопроводности*

При измерении температур жидкости, газа или пара термопреобразователь устанавливается в трубопроводе, газоходе, в других местах технологического оборудования. При этом в общем случае имеет место сложный теплообмен между термопреобразователем, измеряемой и окружающей средами и частями технологического оборудования.

Если считать, что передача теплоты по термопреобразователю осуществляется только за счет теплопроводности, то можно оценить погрешность измерения для термопреобразователя, который представляет собой однородный стержень, заделанный одним концом

в стенку трубопровода. Для такого полуограниченного стержня отклонение температуры термопреобразователя  $t_r$  от температуры измеряемой среды  $t_c$  определяется уравнением

$$t_c - t_r = (t_c - t_{cr}) / \operatorname{ch} [l \sqrt{(P\alpha_k)/(\lambda S)}] \quad (6.2)$$

где  $t_{cr}$  — температура стенки трубопровода в месте заделки термопреобразователя (стержня) длиной  $l$ , °С, периметром  $P$ , м и сечением  $S$ , м<sup>2</sup>;  $\alpha_k$  — коэффициент конвективной теплоотдачи между измеряемой средой и термопреобразователем, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности его чехла, Вт/(м · К).

Зная температуры термопреобразователя и стенки, можно определить температуру измеряемой среды  $t_c$  или по температуре среды и температуре стенки  $t_{cr}$  оценить температуру термопреобразователя  $t_r$  [15]. Эти расчеты носят приближенный, оценочный характер, так как реальные термопреобразователи имеют конструкцию более сложную, чем полуограниченный стержень.

Кроме того, учитывается только передача теплоты теплопроводностью. Можно приближенно считать, что передача теплоты по термопреобразователю только за счет теплопроводности имеет место при измерении температуры жидкостей, полностью заполняющих пространство, в котором он расположен.

Чем меньше теплоты будет передаваться через термопреобразователь, тем меньше будет погрешность, обусловленная теплообменом. Рассмотрим способы уменьшения этой погрешности, анализируя выражение (6.2). Увеличение длины  $l$  повышает термическое сопротивление и уменьшает погрешность. В связи с тем, что размеры трубопровода часто ограничены, то увеличивают длину термопреобразователя, устанавливая его наклонно (рис. 6.9, а), в колене трубопровода (рис. 6.9, б), либо в расширителе, представляющем вставку ограниченного участка трубы большего диаметра (рис. 6.9, в).

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 термопреобразователи. Измеряемый газ с большой скоростью просасывается через специальный керамический фильтр, омывая термопреобразователь. Все это расположено в водоохлаждаемом устройстве. Таким образом, с одной

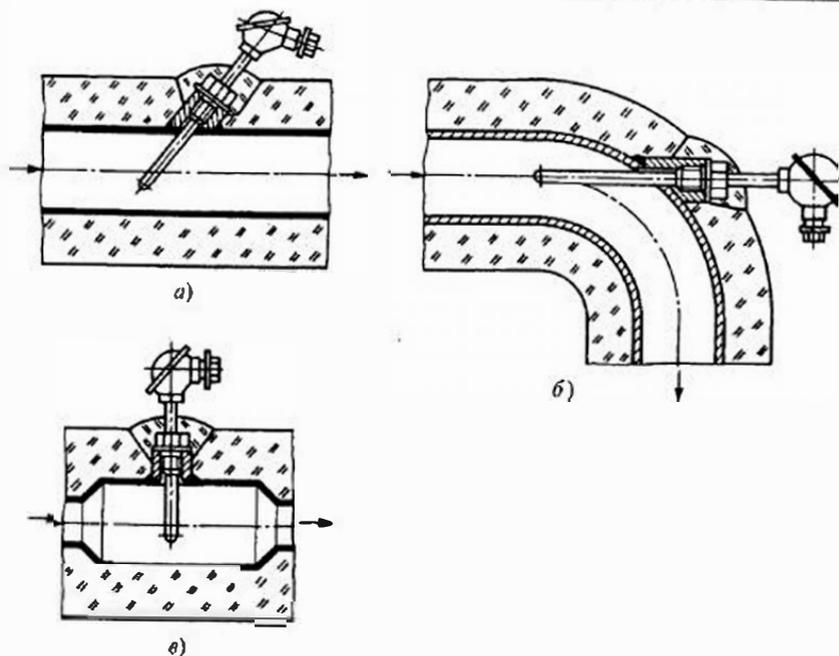


Рис. 6.9. Размещение термопреобразователя в трубопроводе:  
 а — наклонное; б — в колене; в — в расширителе

стороны, увеличивается  $\alpha_k$ , а с другой — уменьшается теплоотдачи за счет излучения.

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

Приближение температуры стенки  $t_{ст}$  к температуре среды  $t_c$  уменьшает теплопередачу теплопроводностью. Во многих случаях тепловая изоляция трубопровода делает температуру стенки близкой к температуре измеряемой среды и тогда эта погрешность практически 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 методическая погрешность за счет теплоотвода составляет 0,01...0,02 °С.

### Погрешности, обусловленные влиянием лучистого теплообмена

При измерении высоких температур газового потока можно считать, что определяющее влияние имеет передача теплоты излучением. Если предположить, что термопреобразователь отдает (воспринимает) теплоту только за счет конвективного  $Q_k$  и лучистого  $Q_\lambda$  теплообмена, то при  $Q_k = \alpha_k S_T (t_c - t_T)$  и  $Q_\lambda = C_0 \epsilon_{пр} S_T [(T_T/100)^4 - (T_{ст}/100)^4]$ ,

$$(t_c - t_T) = C_0 \epsilon_{пр} / \alpha_k [(T_T/100)^4 - (T_{ст}/100)^4] \quad (6.3)$$

где  $C_0 = \sigma \cdot 10^8$ ;  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана;  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\epsilon_{пр}$  — приведенный коэффициент теплового излучения термопреобразователь — стенка при  $S_T \ll S_{ст}$ ;  $S_T$  и  $S_{ст}$  — площади поверхности термопреобразователя и стенки,  $\text{м}^2$ ;  $T_T$ ,  $T_{ст}$  — температуры термопреобразователя и стенки, К.

По температуре термопреобразователя ( $t_T$  и  $T_T$ ) и температуре стенки ( $T_{ст}$ ), зная  $\alpha_k$  и  $\epsilon_{пр}$ , можно определить температуру измеряемой среды  $t_c$  [15]. Еще раз отметим, что хотя расчет делается для идеализированных условий, он дает возможность оценить порядок погрешности за счет излучения.

Теплообмен излучением может быть уменьшен в результате уменьшения  $\epsilon_{пр}$ . Для этого поверхность термопреобразователя полируют, делая зеркальной. Однако в реальных условиях эта поверхность быстро окисляется и  $\epsilon_{пр}$  увеличивается. Поэтому этот путь может быть использован только в отдельных случаях.

Повышение температуры стенки за счет ее внешней изоляции также приводит к снижению погрешности за счет лучистого теплообмена. Однако не всегда можно осуществить такую изоляцию. Поэтому одним из способов приближения температуры окружающей термопреобразователь поверхности к температуре среды является применение экранов. Для уменьшения лучистого теплообмена вокруг термопреобразователя располагается двух- или трехслойный экран. Поскольку его температура практически совпадает с температурой газов, то существенно снижается теплообмен излучением.

### Измерение нестационарных температур

Если в установившемся режиме погрешность измерения температуры зависит в основном от теплового потока, проходящего через

термопреобразователь, то в неустановившемся, нестационарном режиме возникает динамическая погрешность, которая зависит от динамических свойств термопреобразователей, определяемых многими факторами.

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

Динамические свойства термопреобразователей зависят не только от их конструкции и теплофизических свойств материалов, но и от условий теплообмена. Поэтому все расчетные или экспериментально определенные численные значения динамических характеристик термопреобразователей будут справедливы только для данного термопреобразователя и конкретных условий теплообмена. Для характеристики динамических свойств термопреобразователей применяется показатель тепловой инерции  $\epsilon$ , значение которого дается в технической документации на термопреобразователи. В соответствии с ней для большинства последних  $\epsilon$  определяется при перемещении термопреобразователя из резервуара с водой температурой 20 °С в резервуар с водой температурой 80 °С. Временное изменение выходного сигнала преобразователя иллюстрирует график, представленный на рис. 6.10. В момент  $t_0$  измеряемая температура среды  $t_c$  меняется скачком, связанным с переносом термопреобразователя из одного резервуара в другой. Температура при этом меняется от  $t_n$  до  $t_k$ . Выходной сигнал термопреобразователя  $t_r$  при этом отстает от измеряемой температуры и достигнет ее значения только через некоторое время  $t_\infty$ . В течение промежутка времени от  $t_0$  до  $t_\infty$  будет иметь место динамическая погрешность, равная  $t_r - t_c$ . Показатель тепловой инерции  $\epsilon$  определяется как время, в течение которого изменение  $t_r$  от значения  $t_n$  составит  $0,63(t_k - t_n)$ . Этот показатель у обще-

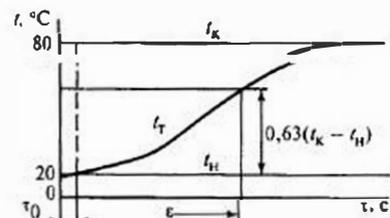


Рис. 6.10. Изменение выходного сигнала термопреобразователя

промышленных термопреобразова-

телей находится в пределах 5...100 с. Значения более 30 с относятся к термоэлектрическим преобразователям с изолированным спаем. Показатель тепловой инерции используется для сопоставления между собой динамических свойств термопреобразователей и выбора последних с учетом температурной нестационарности контролируемых процессов.

### Измерение температуры жидких и газовых сред

Установка термопреобразователей на объектах измерения должна производиться таким образом, чтобы рассмотренные погрешности, связанные с теплообменом излучением и теплоотводом, были сведены к минимуму, при этом механическая нагрузка со стороны движущихся сред должна соответствовать расчетной. Обычно в различных отраслях промышленности действуют внутриведомственные нормы, которые регламентируют правила монтажа термопреобразователей на различных технологических объектах.

При измерении температуры стеклянными термометрами для механической защиты их помещают в металлические чехлы. Для правильного измерения температуры должна быть обеспечена необходимая глубина погружения термометра. Для улучшения теплоотдачи внутренняя часть чехла высотой до 30 мм заполняется маслом.

При установке термопреобразователей в трубопроводе середина его чувствительного элемента должна совпадать с осью трубопровода. Схема радиальной установки преобразователя представлена на рис. 6.11. Термопреобразователи могут устанавливаться и наклонно навстречу потоку. При диаметре трубопровода менее 50 мм термопреобразователи устанавливают либо в колене трубопровода, либо в расширителе (см. рис. 6.9). При измерении температуры газов из-за низких коэффициентов теплоотдачи возрастает роль лучистого теплообмена и связанных с ним погрешностей.

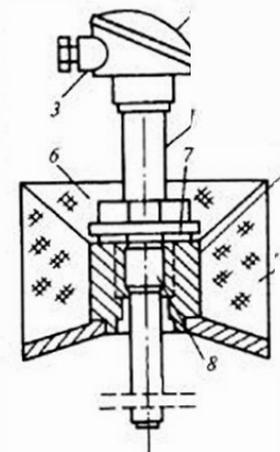


Рис. 6.11. Установка термопреобразователя в трубопроводе:

1 — термопреобразователь; 2 — головка; 3 — штуцер для ввода проводов; 4 — бобышка; 5 — изоляция трубопровода; 6 — съемный слой изоляции; 7 — прокладка; 8 — штуцер

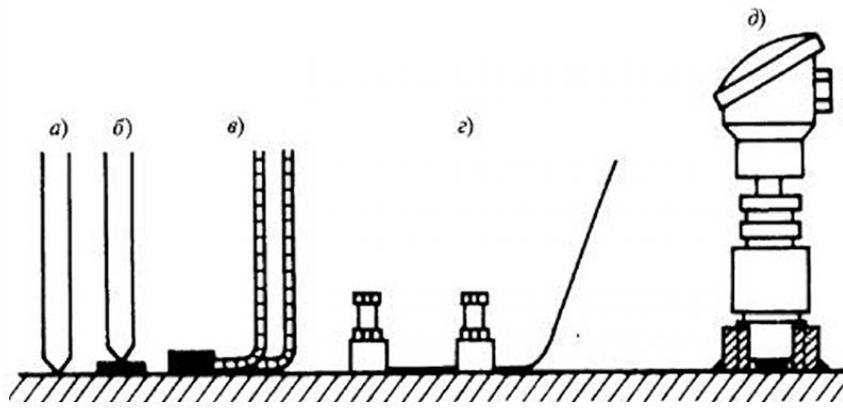


Рис. 6.12. Варианты измерения температуры поверхности: а — спай изолированных эмалью термоэлектродов приварен к поверхности; б — к контактной пластинке; в — спай изолированных бусами электродов зачеканен в отверстии, приваренной к поверхности пластине; г — промышленная поверхностная термопара закреплена с помощью приваренных прижимов; д — установка промышленного поверхностного термопреобразователя ТХАП

### Измерение температуры поверхностей

При измерении температур поверхностей контактными термопреобразователями обычно существуют две проблемы: 1) обеспечение равенства температур термопреобразователя и измеряемой поверхности; 2) исключение возможного искажения температуры или температурного поля поверхности в месте измерения термопреобразователем.

Для обеспечения равенства температур термопреобразователя и измеряемой поверхности необходимо создать наилучшие условия теплопередачи от поверхности объекта измерения к термопреобразователю. В связи с этим даже очень малые воздушные зазоры или слои материалов с низкой теплопроводностью между измеряемой поверхностью и термопреобразователем могут существенно исказить результаты измерения.

Для обеспечения хорошего теплового контакта желательно специально изготовленный термометр приклеивать, припаивать или приваривать к поверхности (рис. 6.12). Возможна механическая зачеканка спаев на поверхности объекта, но только в случае неокисляемости поверхностей объекта и термопреобразователя в условиях измерения.

Искажение температуры или температурного поля поверхности объекта измерения будет происходить в том случае, если термопреобразователь 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 термопреобразователь, стараются перенести этот теплообмен из точки измерения температуры в другую точку.

Для непрерывного измерения температуры поверхности используют промышленные поверхностные термопреобразователи, в обозначении присутствует буква П, например ТХАП. Установка таких термопреобразователей показана на рис. 6.12, г, д. Термопреобразователь (рис. 6.12, г) прижат к поверхности специальными зажимами. Наличие изоляции трубопровода практически исключает отвод (или подвод) теплоты от места измерения и поэтому термопреобразователь не искажает температуры поверхности, а хороший тепловой контакт между термометром и поверхностью с помощью зажима обеспечивает равенство температур термометра и поверхности.

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 контролируемой поверхности или его применению препятствуют другие причины. Поэтому достаточно широко применяются контактные термопреобразователи. При этом возникает проблема обеспечения теплового контакта между термопреобразователем и движущимся телом, либо проблема передачи измерительного сигнала с движущегося тела на стационарную измерительную установку. Если термопреобразователь жестко закреплен на измеряемой поверхности и его температура равна температуре поверхности, то при малых поступательных перемещениях это можно осуществить с помощью гибких соединительных проводов. При вращательном движении передача сигнала производится с помощью вращающихся контактных колец.

### Измерение температур в энергетических реакторах

Измерение температур в энергетических реакторах и активной зоне имеет свои специфические особенности. Во-первых, это радиационная безопасность, которая требует применения методов и средств измерения температуры, отличающихся высокой надежностью, во-вторых, — обеспечение длительной работы средств изме-

рения температуры со стабильными или практически стабильными градуировочными характеристиками.

Вопросы надежности средств измерения температуры сводятся в основном к созданию такой конструкции термопреобразователей, 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 °С. Занижение температуры оболочек относительно расчетной приводит к падению мощности реактора. Повышение 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 термопреобразователи (см. § 6.2, рис. 6.6), обладающие повышенной стойкостью к тепловым ударам, вибрации, механическим нагрузкам. Важными достоинствами кабельных термопреобразователей являются возможность получения малых диаметров (до 0,5 мм), различного поперечного сечения — круглых, плоских, овальных.

Кабельные термоэлектрические преобразователи имеют достаточную длину и гибкость для прокладки в самых труднодоступных местах. В зависимости от конструкции ТВЭЛов применяются различные способы заделки кабельных термопреобразователей в оболочку ТВЭЛов. Это может быть их заделка в дистанционирующее ребро на оболочке ТВЭЛа, в котором находится топливо. Возможно крепление термопреобразователя к оболочке способом плазменного напыления и другие способы. Варианты крепления и размеры термопреобразователя определяются конструкцией и размерами оболочки ТВЭЛа, а также обеспечением минимального искажения температуры оболочки в месте измерения самим термопреобразователем и его креплением. Вопросы измерения температуры ТВЭЛов и другие аспекты реакторной термометрии подробно рассмотрены в [18]. Кроме обычных выпускаются кабельные многозонные термопреобразователи диаметром 3 и 6 мм с числом рабочих спаев 3 и 5, расстоянием ме-

жду спаями 1000 и 1500 мм и максимальной длиной термопреобразователя 25 м.

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

Для измерения максимальной температуры графита применяется термопреобразователь, располагаемый с помощью направляющего устройства в центре канала ячейки графитовой кладки. 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 кабельные термоэлектрические преобразователи, 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 преобразователей: 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 преобразователи заключены в герметичные трубки, их соединительные линии 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 цилин-

дрической части малого диаметра. Для обеспечения герметичности контура с активной средой и высокой надежности средств измерений широкое применение находят как многоэлементные, так и многозонные кабельные термопреобразователи, позволяющие сократить число сверлений в трубопроводах и емкостях оборудования АЭС.

Большое значение при измерении температуры в реакторах имеет вопрос стабильности градуировочных характеристик средств измерений в условиях ионизирующих излучений большой мощности. Термопреобразователи, 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 термопреобразователей. В термоэлектрических преобразователях под влиянием радиации могут возникать временные отклонения выходного сигнала и длительные, или интегральные, отклонения. Временные отклонения наблюдаются в термопреобразователях при воздействии излучения и исчезают при прекращении излучения при неизменной измеряемой температуре. Длительные или интегральные отклонения выходного сигнала имеют место при длительном воздействии излучения, когда термопреобразователь «набрал» определенный флюенс излучения (количество ионизирующих частиц). Эти отклонения выходного сигнала 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 преобразователей 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 [18].

Анализ интегральных отклонений выходных сигналов показал, что практически не имеют интегральных отклонений хромель-алюмелевые термоэлектрические преобразователи, которые подвергались облучению с плотностью потока ионизирующих частиц до  $4,5 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$  при температуре 1000 °С. При тех же условиях интегральные отклонения платинородий-платиновых термопреобразователей составили 30 °С. 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 [18]. Таким образом, применение хромель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей в реакторных измерениях позволяет практически исключить интегральные отклонения выходного сигнала.

Термопреобразователи 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 термопреобразователей. Из-за лучшей стабильности и большего диапазона измерений предпочтение отдается платиновым термопреобразователям сопротивления, медные на АЭС не применяются.

#### *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 термопреобразователи сопротивления и термоэлектрические. Термопреобразователи сопротивления применяют для измерения температур от 0,01...0,02 К и выше. Особенностью использования термопреобразователей сопротивления из металла является то, что их сопротивление при низких температурах становится настолько малым, что затрудняет их измерение. При этом уменьшается коэффициент преобразования термопреобразователя, что влияет на точность измерения. Возрастает влияние дефектов кристаллической решетки материала термопреобразователя на его сопротивление при низких температурах.

Уменьшение теплоемкости материалов при низких температурах может привести к существенному отличию собственной температуры чувствительного элемента термопреобразователя от температуры измеряемой среды за счет самонагрева и подвода теплоты по проводам и защитной арматуре.

Из металлических в области от 10 К и выше широко применяются платиновые термопреобразователи сопротивления. В отдельных работах они применялись до 2 К. Для измерения низких температур разработана специальная конструкция миниатюрного платинового термопреобразователя сопротивления. Длина чувствительного эле-

мента ( $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ) преобразователя составляет 8 мм, диаметр 1,6 мм, диаметр защитного чехла 2...3 мм. Термопреобразователи сопротивления из других металлов в РФ практически не применяются. За рубежом некоторое распространение получили никелевые термопреобразователи сопротивления (в интервале 77...300 К) и из манганина (в интервале 4,2...300 К).

Все термопреобразователи из металлов изменяют свое сопротивление под влиянием магнитного поля, причем чем ниже температура, тем больше это влияние. Для платинового термопреобразователя это влияние наибольшее: при температуре 13 К магнитная индукция до 2 Тл вызывает увеличение сопротивления до 40 %, при 50 К прирост сопротивления при той же магнитной индукции составляет доли процента. У других преобразователей из металла магниторезистивный эффект почти на порядок меньше, но он имеет место.

Для измерения температур ниже 13 К в РФ в основном применяются германиевые термопреобразователи 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 понижением температуры и при гелиевых температурах исчисляется сотнями и тысячами Ом. Коэффициент преобразования при этих температурах составляет  $10^2 \dots 10^3 \text{ Ом/К}$ . Серийные германиевые термопреобразователи сопротивления имеют предел допускаемых погрешностей 0,05...0,1 К. Эталонные германиевые термопреобразователи обладают стабильностью градуировочной характеристики до 0,001 К. Хотя их конструктивное выполнение различно, но в общем случае кристалл германия, к которому приварены выводы, помещается в защитную гильзу (корпус), заполненную гелием, улучшающим теплообмен с измеряемой средой. Германиевые термопреобразователи сопротивления также подвержены влиянию магнитных полей. Это влияние меньше, чем для платиновых термометров, но при поле в 10...15 Тл погрешность из-за его 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 термопреобразователи. У них влияние магнитных полей в 15 Тл изменяет их показания не более, чем на 4—7 % для температур от 0,01 до 1,5 К. Угольные термопреобразователи сопротивления, так же, как и германиевые, имеют отрицательный температурный коэффициент и изготавливаются из каменного угля в результате специальной термообработки.

Одним из главных достоинств угольных термопреобразователей является то, что их коэффициент преобразования практически обратно пропорционален температуре. Для малых объектов применяют пленочные угольные термопреобразователи, изготавливаемые нанесением слоя коллоидного раствора графита на подложку или непосредственно на поверхность объекта. К числу недостатков угольных термопреобразователей следует отнести нестабильность их градуировочной характеристики. Из термоэлектрических преобразователей наибольшее распространение для измерения температур от 20 до 300 К получил медь-константовый. Однако его коэффициент преобразования существенно уменьшается с понижением температуры. Термоэлектрические преобразователи уступают термопреобразователям сопротивления в точности и стабильности градуировочной характеристики.

Манометрические термометры (газовые и конденсационные) довольно широко используются для лабораторных и технических измерений криогенных температур. Главным преимуществом газовых термометров является возможность их применения без предварительной градуировки в широкой области температур. 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. Размеры термобаллона значительны и возможно влияние температуры окружающей среды, поэтому область применения газовых термометров ограничена.

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, которые определяются особенностями теплообмена чувствительного элемента термопреобразователя не только с измеряемой средой, но и с окружающей и элементами конструкции установки.

**Измерение температуры расплавов**

Сложность измерения температуры расплавов определяется в основном активной коррозией защитного чехла термопреобразователя. Методические погрешности при измерении температуры расплавов практически можно не принимать во внимание, так как теплоотдача от расплава к чехлу термопреобразователя, как правило, очень хорошая. Исключения составляют синтетические материалы большой вязкости (пластмассы, синтетика, синтетический каучук и др.), в которых коэффициент теплоотдачи невелик. Конструкция термопреобразователя в этом случае должна обеспечить его необволакиваемость материалом и минимальную погрешность из-за теплоотвода через чехол.

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 термопреобразователь с толсто-стенным защитным чехлом из обычной дешевой стали, который одновременно является одним из электродов термоэлектрического преобразователя.

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 печей. Внутри графитового чехла должен быть расположен газоплотный внутренний чехол для защиты термопары из благородных металлов от воздействия восстановительной атмосферы углерода. Термопреобразователи такой конструкции имеют большую тепловую инерцию.

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 оксидом 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 преобразователи кратковременного погружения со смешными измерительными блоками. Последние содержат тонкую термопару, подключаемую к основной части термопреобразователя с помощью пружинных контактных колец. Термопара помещена в кварцевую трубку, защищенную от механических повреждений тонкостенным защитным колпачком. Сменный блок вставляется

в защитный чехол из многослойной бумаги. 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 преобразователя и заменяют новым. Для измерения применяются термопары платинородий-платинородиевые (тип В) и вольфрамений-вольфрамсеребряные (ВР 5/20).

**Контрольные вопросы**

1. В каком случае в цепи из двух проводников возникает термоЭДС и какие эффекты вызывают ее появление?
2. Какие существуют способы включения измерительных приборов в цепь термопары?
3. Какие стандартные термопары обладают максимальной и минимальной чувствительностью, максимальным и минимальным диапазоном измерения?
4. Каково устройство кабельных термопар и в какой области они в основном применяются?
5. Для чего нужны удлиняющие термоэлектродные провода и какие требования к ним предъявляются?
6. Какие устройства используются для введения поправки на изменение температуры свободных концов?
7. Какой выходной сигнал имеют термопреобразователи ТХЛУ?

## Глава седьмая

# АНАЛОГОВЫЕ ВТОРИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В практике теплотехнических измерений вторичные приборы подразделяются на электрические — для измерения и преобразования электрических сигналов (естественных и унифицированных) и пневматические для измерения и преобразования пневматических унифицированных сигналов (20...100) кПа.

Основные группы электрических вторичных приборов и преобразователей предназначены для измерения и преобразования:

- активного сопротивления;
- термоЭДС и напряжения;
- сигналов переменного тока в дифференциально-трансформаторной системе дистанционной передачи;
- унифицированных токовых сигналов 0...5, 0...20, 4...20 мА.

Передача информации с использованием токового унифицированного сигнала обеспечивает по сравнению с передачей на переменном токе снижение требований к линиям связи и высокую помехоустойчивость, поскольку фильтрация наводок в линиях не вызывает затруднений. На первый план в таких цепях выходит задача гальванического разделения цепей, поскольку наличие заземленных точек в цепях первичных преобразователей приводит к образованию паразитных контуров и служит источником погрешности передачи сигналов. В связи с этим в элементах, коммутирующих сигналы первичных приборов, в большинстве случаев используется двухполюсный разрыв цепи.

Результаты измерения и преобразования могут быть представлены в аналоговой или цифровой форме. Пределы измерения и преобразования вторичных приборов стандартизованы. Для измерения температуры они приведены в табл. 7.1, давления — в табл. 10.2, уровня — в § 11.1, расхода — в § 12.1. Аналоговые измерительные приборы могут иметь прямые вертикальные или горизонтальные шкалы различной длины (запись на бумаге в прямоугольных координатах) или дуговые шкалы (запись на бумажном диске в полярных координатах), а также — дополнительные устройства, расширяющие

Таблица 7.1

Пределы измерений вторичных приборов для измерения температуры

НСХ	Пределы измерений, °С
ХК(L)	-200...100; -50...50; -50...100; -50...150; -50...200; 0...100; 0...150; 0...200; 0...300; 0...400; 0...600; 0...800; 200...600; 200...800
ХА(К)	-200...100; 0...400; 0...600; 0...850; 0...900; 0...1100; 0...1300; 200...600; 200...1200; 400...900; 600...1100; 600...1300; 700...1300
ПП(S)	0...1300; 0...1600; 500...1300; 1000...1600
ПР(В)	300...1100; 300...1600; 1000...1600; 1000...1800
ВР(А)	0...1800; 100...1800
50П, 100П	-200...-70; -120...30; -90...50; -70...180; -25...25; -200...50; -120...300; -200...50; 0...100; 0...150; 0...200; 0...300; 0...400; 0...500; 0...600; 200...500; 200...600; 300...700; 500...1000
50М, 100М	-25...25; -50...0; -50...50; -50...100; 0...50; 0...100; 0...150; 0...20; 50...100; 100...200

их функциональные возможности (регистрацию на бумажной ленте, сигнализацию предельных значений, встроенные функциональные блоки и т.п.).

## 7.1. Средства измерения и преобразования термосопротивлений

Для измерения сопротивления термопреобразователей используются три метода:

- по падению напряжения на ТС, создаваемому известным рабочим током (потенциметрический);
- мостовые методы измерений;
- с использованием логометров.

### 7.1.1. Потенциметрический метод измерения сопротивлений

Суть метода легко пояснить схемой измерения с использованием образцового резистора  $R_6$  с известным сопротивлением (рис. 7.1, а).

С помощью потенциметра ИП измеряется падение напряжения  $U_i$  на термопреобразователе и напряжение  $U_6$  на образцовом резисторе  $R_6$ . По значению  $U_6$  можно определить ток  $I = U_6/R_6$ , а зная ток можно определить сопротивление термопреобразователя

$$R_i = \frac{U_i}{U_6} R_6. \quad (7.1)$$

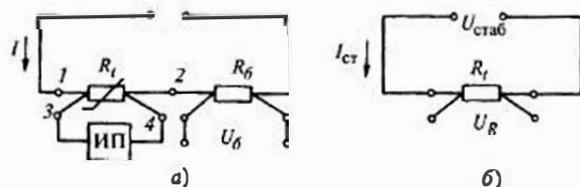


Рис. 7.1. Схема измерения сопротивления по падению напряжения при измеряемом (а) и стабилизированном токе (б)

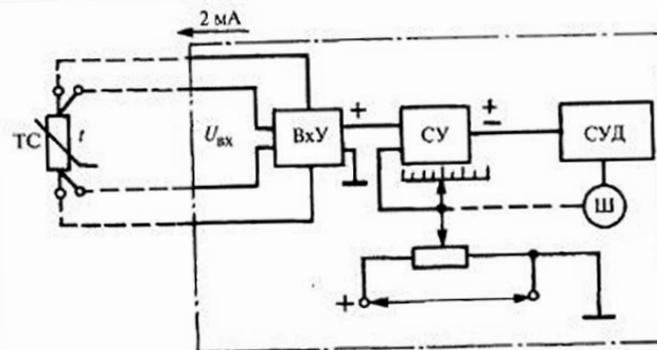
Такой метод используется для точного измерения температуры. При измерении  $U_t$  потенциометром показания снимаются при компенсации измеряемого напряжения внутренним напряжением прибора, известным с высокой точностью. При компенсации этих напряжений в соединительных проводах 3, 4 ток отсутствует. Это позволяет исключить влияние подводящих проводов на результат измерения сопротивлений. При этом методе измерения сопротивлений используются термопреобразователи с четырьмя выводами от одного чувствительного элемента (например, см. рис. 5.5, а или 5.5, б). В принципе можно использовать ТС с двумя выводами, т.е. измерять напряжение между точками 1 и 2 (см. рис. 5.5, в). Однако в этом случае будет измеряться суммарное сопротивление чувствительного элемента и подводящих проводников (между точками 1 и 2 и чувствительным элементом). У реального преобразователя длина выводов от чувствительного элемента до головки преобразователя может быть большой, поэтому их сопротивление может быть значительным.

Схему измерения можно упростить (рис. 7.1, б), если через ТС пропускать ток  $I$  строго определенного значения от стабилизатора. Очевидно, в этом случае (при большом входном сопротивлении измерительной схемы):

$$R_t = \frac{U_R}{I}. \quad (7.2)$$

Такая схема используется в промышленных приборах РП-160, «Технограф».

Упрощенная схема прибора РП-160 представлена на рис. 7.2. Преобразователь по четырехпроводной схеме (четырьмя проводами) подключается к входному нормирующему усилителю ВхУ. По двум соединительным проводам подводится стабилизированный рабочий ток 2 мА, двумя другими снимается напряжение  $U_{вх}$  с чувствитель-



ного элемента ТС, зависящее от его сопротивления. Это напряжение поступает на усилитель ВхУ, выходное напряжение постоянного тока изменяется в диапазоне (0...1) В, т.е. при температуре нижнего предела измерения оно равно 0 и при температуре верхнего предела измерения равно 1 В. Это напряжение поступает на вход суммирующего усилителя (СУ). На другой вход этого усилителя поступает потенциал от движка реохорда, который питается стабилизированным напряжением 1 В. Разностный сигнал  $\pm \Delta U$  (т.е. разность напряжений от входного усилителя и рабочего участка реохорда) идет на схему управления шаговым (Ш) двигателем СУД. В зависимости от знака разностного сигнала  $\Delta U$  СУД определяет направление вращения вала двигателя и его скорость, и включает двигатель, который с помощью механической связи (показана штрихом) перемещает движок реохорда до того положения, при котором  $\Delta U = 0$ . После этого двигатель останавливается. С движком реохорда жестко скреплена стрелка, которая покажет значение температуры. При компенсационном методе измерения напряжения и большом сопротивлении соединительных проводов (или его изменение) не влияет на результат измерения, но влияет на чувствительность.

Вторичные приборы типа РП-160 используются как автоматические показывающие и регистрирующие приборы, работающие с термопреобразователями сопротивления, термопарами, преобразователями с унифицированным выходным сигналом. Технические характеристики приборов РП-160 приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

## Технические характеристики электрических вторичных приборов

Тип прибора	Тип шкалы	Предельная погрешность		Число точек измерения	Время прохождения указателем всей шкалы, с
		показаний, %	записи, %		
КСП1 КСМ1 КСУ1	Прямая горизонтальная, длиной 100 мм	$\pm 1$	$\pm 1$	1	2,5; 5; 10
КПП1 КПМ1 КПУ1	Дуговая длиной 300 мм	$\pm 0,5$	Запись отсутствует	1	2,5; 5; 10
КСП2 КСУ2 КСМ2	Прямая горизонтальная, длиной 160 мм	$\pm(0,5; 1,0)$	$\pm 1$	1, 3, 6, 12	10
РП-160	Прямая горизонтальная, длиной 160 мм	$\pm 0,5$	$\pm 1$	12	2,5; 5; 10; 15
РП-100	Цифровое табло	$\pm 0,25$	В аналоговой форме $\pm 0,5$ В цифровой форме $\pm 0,25$	6	2,5; 5; 10; 15
Диск-250	Дуговая, длиной 600 мм	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	1	5; 16
КСД-250	Дуговая, длиной 600 мм	$\pm 1,0$	$\pm 2,5$	1	5; 16
А-100 А-100Н А-543	1, 2 или 3 прямых вертикальных длиной 100 мм	$\pm 0,5$	$\pm 1$	1, 2 или 3 независимых канала	1; 2,5; 5; 10;
КП 140 КМ 140	Дуговая	$\pm(0,5; 1,0)$	Запись отсутствует	1	5
РМТ-39	Прямая горизонтальная, длиной 400 мм	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	6	—
РМТ-49	Аналого-цифровой	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	1, 2	—

## 7.1.2. Мостовые методы измерения сопротивления

Одними из наиболее распространенных средств измерения сопротивления являются мостовые. Простейшая схема четырехплечего моста изображена на рис. 7.3. Схема содержит резисторы, источник питания  $U_{\text{пит}}$  и измерительный прибор (ИП). При анализе мостовых схем следует пользоваться общепринятой терминологией. Точки  $a$  и  $b$ , к которым в параллельной цепи подводится напряжение питания, образуют диагональ питания. Точки  $c$  и  $d$ , с которых напряжение  $U_{\text{вых}}$  снимается на измерительный прибор, образуют измерительную диагональ. Точки  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  называются вершинами моста. Резисторы между двумя соседними вершинами —  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_m$ ,  $R_x$  образуют плечи моста,  $R_x$  — резистор, сопротивление которого нужно измерить. Плечи, не имеющие общих вершин, называются противолежащими. В данном случае это резисторы  $R_1$  и  $R_m$ ,  $R_2$  и  $R_x$ . Плечи, имеющие общую вершину, называются смежными (прилежащими), т.е. это резисторы  $R_1$  и  $R_2$ ,  $R_2$  и  $R_m$ ,  $R_m$  и  $R_x$ ,  $R_x$  и  $R_1$ . Плечи могут состоять из многих резисторов, включенных различными способами, резисторы могут входить и в диагонали. Плечи моста могут быть образованы не только активными сопротивлениями, но и индуктивными, емкостными или их сочетаниями. Типовой схемой является включение переменного резистора в качестве корректора нуля в одну из вершин моста, например между  $R_1$  и  $R_2$ .

**Уравновешенные мосты.** Мосты подразделяются на уравновешенные и неуравновешенные. Состояние моста, при котором  $U_{\text{вых}} = 0$ , называется равновесным состоянием, а мост в таком состоянии называется *уравновешенным*. Этот метод измерения сопротивлений является разновидностью компенсационного (нулевого) метода измерений. Для уравновешивания моста при изменениях  $R_x$  используется известное переменное сопротивление. На рис. 7.3 это магазин сопротивлений  $R_m$ . При  $U_{\text{вых}} = 0$  и  $I_{\text{пит}} = 0$ , через  $R_x$  и  $R_m$  протекает один и тот же ток  $I_1$ , а через  $R_1$ ,  $R_2$  — ток  $I_2$ , тогда  $R_x I_1 = R_1 I_2$  и  $R_m I_1 = R_2 I_2$ . Разделив эти равенства, получим  $R_x/R_m = R_1/R_2$  или

$$R_1 R_2 = R_1 R_m$$

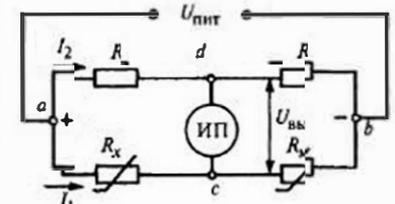


Рис. 7.3. Схема уравновешенного моста

т.е. условием равновесия моста является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч моста. Из (7.3) следует, что

$$R_x = R_M R_1 / R_2. \quad (7.4)$$

Плечи  $R_1$ ,  $R_2$  называют плечами соотношения, поскольку они определяют масштаб уравнивающего сопротивления магазина. Уравнение (7.4) определяет положительные стороны измерения сопротивления с помощью уравновешенного моста:

- независимость результата измерения от напряжения питания;
- линейная зависимость  $R_x$  от  $R_M$ ;
- измерительный прибор выполняет только функции чувствительного нуль-прибора (далее НП), фиксирующего отклонение напряжения измерительной диагонали от нулевого значения.

При нарушении условия равновесия  $R_x R_2 \neq R_1 R_M$  мост становится неуравновешенным, напряжение небаланса  $U_{\text{вых}}$  растет с увеличением разности произведений сопротивлений противоположных плеч и ростом напряжения питания моста.

Таким образом, напряжение питания уравновешенного моста влияет на его чувствительность. Допустимое значение тока через плечи моста ограничивает сверху напряжение питания. Так, ток через термопреобразователь сопротивления не должен превышать 2...4 мА. При возникновении небаланса моста изменением  $R_M$  мост уравнивается и по (7.4) рассчитывается значение измеряемого сопротивления. Погрешность расчета сопротивления  $R_x$  определяется чувствительностью нуль-прибора и погрешностями изготовления магазина сопротивлений и плеч отношения. У лабораторных уравновешенных мостов класс точности, определяющий предел допускаемой относительной погрешности измерения сопротивления, достигает 0,005.

Сопротивление соединительных проводов, с помощью которых резистор  $R_x$  включен в схему моста на рис. 7.3 не показано. Если предположить, что  $R_x$  это термосопротивление  $R_t$ , которое удалено от моста и соединено с ним двумя протяженными проводами с определенным сопротивлением  $R_n$  каждого (рис. 7.4, а), то в выражениях (7.3), (7.4) значение  $R_x$  должно быть заменено на  $(R_t + 2R_n)$ :

$$(R_t + 2R_n)R_2 = R_1 R_M; \quad R_t = R_M R_1 / R_2 - 2R_n. \quad (7.5)$$

Для стабилизации характеристики моста сопротивление  $R_n$  с помощью подгоночных катушек доводится до определенного значения. Однако при изменении температуры окружающей среды  $R_n$  будет изменяться. На изменение  $R_n$  (при неизменном  $R_t$ ) мост будет

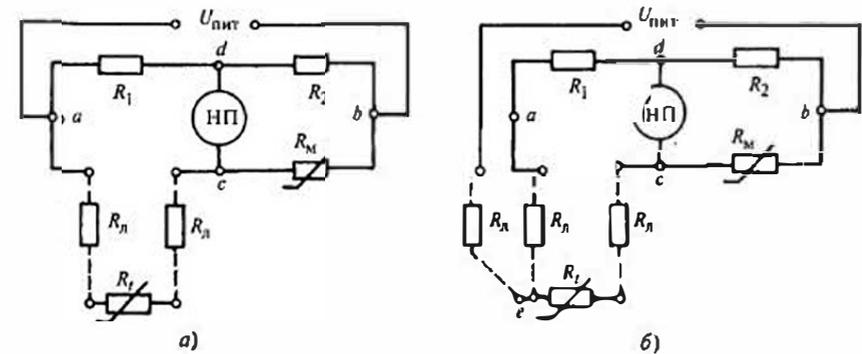


Рис. 7.4. Схемы подключения термопреобразователей сопротивления с двухпроводной (а) и трехпроводной (б) линиями

реагировать как на изменение  $R_t$  — возникнет дополнительная погрешность. Для ее снижения используется трехпроводная схема подключения ТС (рис. 7.4, б). Для перехода к трехпроводной линии необходимо один из зажимов источника питания третьим проводом соединить с зажимом  $R_t$ . Если сравнить рис. 7.4, а и 7.4, б, то переход от двух к трехпроводной линии осуществляется следующим образом: нужно источник питания отключить от точки  $a$  на рис. 7.4, а. И третьим проводом подключить его к точке  $e$ . Для этого можно использовать ТС с тремя выводами от ЧЭ термопреобразователя (см. рис. 5.5, з).

Перенос диагонали питания приводит к изменению плеч моста, условия равновесия и уравнения измерения (7.5):

$$(R_t + R_n)R_2 = R_M(R_1 + R_n); \quad R_t = R_M R_1 / R_2 + R_M / R_2 R_n - R_n. \quad (7.6)$$

Эти выражения показывают, что использование трехпроводной схемы подключения ТС приводит к снижению влияния изменений сопротивления линий связи как на равновесие моста, так и на результат измерения  $R_t$ . В частном случае при  $R_M = R_2$  влияние сопротивления линий связи будет отсутствовать.

Упрощенная схема автоматического уравновешенного моста представлена на рис. 7.5. Автоматическим он называется потому, что уравнивание моста при изменениях  $R_t$  произво-

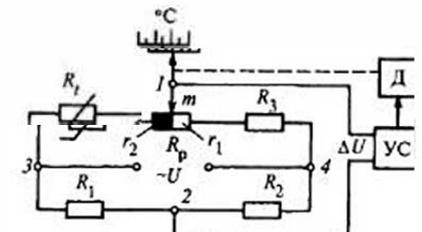


Рис. 7.5. Упрощенная схема автоматического уравновешенного моста

дится автоматически реверсивным двигателем, перемещающим движок реохорда  $R_p$ .

Реохорд — это проволочный резистор, витки которого равномерно распределены на изолированной шине определенной длины. Сопротивление реохорда имеет строго фиксированное значение. На реохорде находится подвижной контакт — движок, при его перемещении меняются сопротивления плеч моста и производится его уравнивание. При любом изменении измеряемой температуры  $t$  движок устанавливается в новое положение равновесия автоматической системой следящего уравнивания, состоящей из усилителя УС, двигателя Д и кинематической связи от двигателя к движку (условно показана штрихом). В этой схеме усилитель играет роль индикатора нуля. Измерительная диагональ моста находится между точками 1—2, а диагональ питания 3—4, откуда условие равновесия примет вид

$$(R_1 + r_2)R_3 = (R_2 + r_1)R_4 \quad (7.7)$$

Принцип действия моста состоит в следующем. Предположим, при исходной температуре  $t$  термопреобразователя мост был сбалансирован, т.е. выходное напряжение моста  $\Delta U$  в измерительной диагонали (см. рис. 7.3, аналогичное  $U_{\text{вых}}$ ) равно нулю. Предположим, что измеряемая температура  $t$  увеличилась, при этом возросло сопротивление термопреобразователя  $R_t$ . Это приведет к разбалансу моста, так как первоначально (до начала перемещения движка) окажется, что

$$(R_1 + r_2)R_3 > (R_2 + r_1)R_4 \quad (7.8)$$

т.е. мостовая схема окажется неуравновешенной и на ее выходе появится напряжение  $\Delta U$  с фазой, определяющей направление смещения движка реохорда. Напряжение  $\Delta U$  усиливается с помощью УС, который включает двигатель. Двигатель через кинематическую связь начнет перемещать движок реохорда к положению равновесия мостовой схемы. В новом равновесном состоянии схемы напряжение на входе усилителя  $\Delta U$  исчезнет и двигатель остановится. Новое положение реохорда и связанного с ним указателя будет соответствовать новому значению температуры. Очевидно, что минимальному значению сопротивления, относящемуся к началу шкалы и минимальному значению температуры, соответствует крайнее правое положение движка реохорда,  $r_2 = R_p$  и  $r_1 = 0$ . При конечном значении шкалы, которому соответствует максимальное значение темпера-

туры и сопротивления  $R_t$ , движок реохорда находится в крайнем левом положении, при котором  $r_2 = 0$  и  $r_1 = R_p$ .

Схема автоматического уравновешенного моста (типов КСМ1, КСМ2), с включенным по двухпроводной схеме ТС (т.е. термопреобразователь ТС соединен с мостом двумя проводами), изображена на рис. 7.6, а. Принцип действия остается прежним, но схема несколько усложнена. Реохорд  $R_p$  представляет собой проволочный резистор, имеющий строго определенное сопротивление (обычно 90 Ом, иногда 100 Ом), линейно распределенное на заданной длине, равной длине шкалы (100 мм для автоматических мостов КСМ1, 160 мм для мостов КСМ2 и 250 мм для КСМ4).

Реохорд имеет движок, который перемещается по проволочной намотке реохорда двигателем Д посредством кинематической связи (показана штрихом). Движок реохорда образует вершину моста а. С движком жестко связана показывающая стрелка, перемещающаяся по шкале. Параллельно реохорду включен резистор  $R_{np}$ , определяющий диапазон измерения моста. Сопротивление параллельного

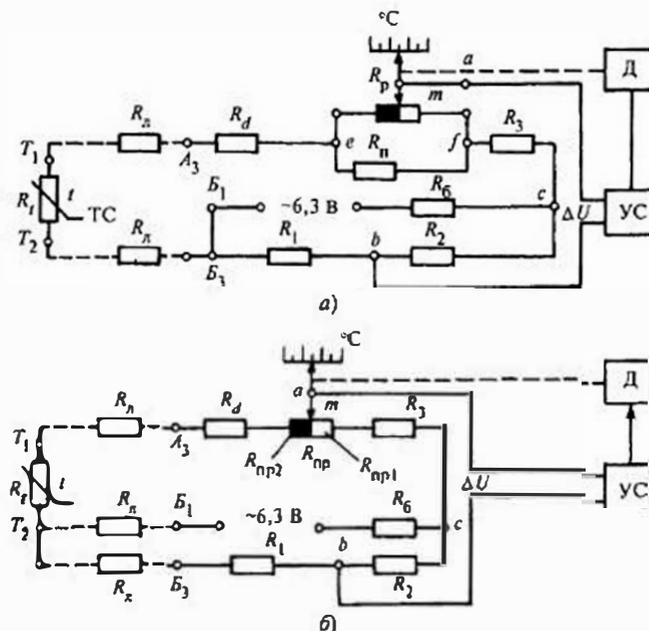


Рис. 7.6. Схема автоматического уравновешенного моста с двухпроводным (а) и трехпроводным (б) подключением ТС

соединения  $R_p$  и  $R_n$  в дальнейшем обозначим  $R_{np}$  (приведенное сопротивление). Резистор  $R_d$  определяет начало диапазона измерения. Последовательно с  $R_d$  и  $R_n$  включены подгоночные резисторы (на схеме не показаны), служащие для подгонки начала и конца диапазона (корректоры нуля и чувствительности). Резистор  $R_6$  служит для ограничения тока через ТС, во избежание его нагрева рабочим током. Обычно, в качестве номинального принимается значение рабочего тока (2...2,5) мА. Питание моста осуществляется переменным током от обмотки силового трансформатора.

Для анализа схемы необходимо определить вершины моста. Две вершины — это точки, к которым подключен усилитель — точки  $a$  и  $b$ . Через две другие вершины к мосту подводится напряжение — это точки  $c$  и  $B_3$ . На рис. 7.6  $A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$  — обозначение зажимов клеммной сборки внешних соединений реального прибора (расположенных на задней стенке прибора),  $T_1, T_2$  — зажимы термопреобразователя. Таким образом, противолежащими являются плечи:  $R_{a B_3} = R_{ac} + R_d + R_n + R_t + R_1$  и  $R_{bc} = R_2$ ;  $R_{ac} = R_{df} + R_3$  и  $R_{B_3 b} = R_1$ , здесь  $R_{df}$  — приведенное сопротивление участка реохорда правее движка,  $R_{ac}$  — приведенное сопротивление участка реохорда левее движка.

Следовательно, мост будет уравновешен при выполнении следующего условия:

$$R_{a B_3} R_{bc} = R_{ac} R_{B_3 b}$$

или

$$(R_{ac} + R_d + R_t + 2R_n)R_2 = (R_{df} + R_3)R_1. \quad (7.9)$$

Долю сопротивления движка между крайним правым и текущим положением (см. рис. 7.6,  $a$ ) обозначим буквой  $m$ .

Таким образом,

$$R_{np} = \frac{R_n R_p}{R_n + R_p}.$$

Следовательно, часть приведенного сопротивления правее движка будет равна  $mR_{np}$ , а левее движка равна  $(1 - m)R_{np}$ .

Сопротивление плеч при произвольном положении движка составит:

$$\begin{aligned} R_{ac} &= mR_{np} + R_3; \\ R_{bc} &= R_2; \end{aligned}$$

$$R_{a B_3} = (1 - m)R_{np} + R_d + R_t + 2R_n$$

$$R_{B_3 b} = R_1$$

Уравнение равновесия запишем в виде

$$[(1 - m)R_{np} + R_d + R_t + 2R_n]R_2 = (mR_{np} + R_3)R_1. \quad (7.10)$$

Тогда легко можно получить уравнение статической характеристики моста  $m = f(R_t)$ . В обобщенном виде она имеет вид

$$m = (R_t + 2R_n)a + b,$$

где  $a$  и  $b$  — величины постоянные для каждой конкретной измерительной схемы и независимые от  $R_t$ .

Отсюда также видны достоинства уравновешенных мостов: независимость показаний от изменения напряжения питания мостовой схемы, линейность статических характеристик  $m = f(R_t)$ . И недостаток: сильная зависимость показаний от изменения сопротивления линий  $R_n$ .

Для уменьшения влияния сопротивления соединительных проводов сопротивление каждого соединительного провода с помощью подгоночных катушек (они расположены на клеммной сборке на задней стенке прибора) необходимо подгонять под значение, указываемое на шкале прибора. Обычно это сопротивление равно 2,5 Ом. В дальнейшем это общее сопротивление будем обозначать символом  $R_n$ . Однако и такая подгонка не устраняет полностью влияния на показания моста изменения сопротивления соединительных проводов. Предположим, что общее сопротивление  $R_n = 2,5$  Ом было установлено при температуре окружающей среды 20 °С, но реальная температура ее 30 °С. Это означает увеличение сопротивления линии  $R_n$ , что приведет к увеличению показаний моста. Влияние изменения сопротивления линии можно уменьшить, включением сопротивлений линий в смежные (соседние) плечи моста. Это достигается применением трехпроводной схемы подключения ТС к автоматическому мосту.

Трехпроводная схема подключения термопреобразователя к мосту изображена на рис. 7.6,  $b$ . Общее сопротивление линии и подгоночной катушки обозначено  $R_n$ , параллельное соединение реохорда  $R_p$  и шунтирующего его резистора  $R_n$  обозначено  $R_{np}$ . Кроме того, не указаны подгоночные резисторы, корректоры нуля и чувствительности.

Как видно на схеме, два соединительных провода, идущих от клемм  $B_1$  и  $B_3$ , подключены к одному зажиму термопреобразователя. Поскольку провод  $B_1$  входит в диагональ питания, то его сопротивление на результат равновесия не влияет, поэтому сопротивление линии  $B_1-T_2$  до определенного значения не подгоняется. Так как через провод  $B_1-T_2$  подводится напряжение питания, то точка  $T_2$  является вершиной моста, остальные вершины — точки  $a, b, c$ . Следовательно, сопротивление двух подводящих проводов оказывается включенным в смежные плечи мостовой схемы. Плечами моста являются сопротивления  $R_{aT_2}, R_{T_2b}, R_{bc}, R_{ca}$ . Условие равновесия должно записываться таким образом:  $R_{aT_2} R_{bc} = R_{ca} R_{T_2b}$ .

Откуда

$$[(1-m)R_{np} + R_d + R_n + R_t]R_2 = (mR_{np} + R_3)(R_1 + R_n). \quad (7.11)$$

Достоинство трехпроводной схемы легко пояснить, если сравнить эту формулу с условием равновесия (7.10) при двухпроводной схеме (в такой схеме снят провод  $B_1-T_2$  и соединены точки  $B_1-B_3$ ). Предположим, что сопротивление соединительных линий  $R_n$  изменилось. Тогда в выражении (7.10) изменится только левая часть равенства, т.е. баланс схемы нарушится и следящая система начнет изменять  $m$ . При этом изменятся показания моста. В трехпроводной схеме (7.11) при изменении  $R_n$  изменяются правая и левая части уравнения равновесия, т.е. разбаланс моста и изменение показаний будут меньшими, чем в двухпроводной схеме.

Рассмотренный автоматический мост относится к комплексу вторичных приборов следящего уравнивания, которые могут быть показывающими КП или самопишущими КС, а также работать в качестве автоматических:

- мостов (КПМ, КСМ) с термопреобразователями сопротивления;
- потенциометров (КПП, КСП) с термоэлектрическими преобразователями;
- миллиамперметров (КПУ, КСУ) для преобразователей с унифицированным токовым выходным сигналом;
- компараторов (КПД, КСД) для преобразователей дифференциально-трансформаторной системы с сигналом 0...10 или 10...0...10 мВн.

Технические характеристики автоматических мостов и других приборов этого комплекса приведены в табл. 7.2.

В **неуравновешенных** мостах напряжение измерительной диагонали изменяется с изменением измеряемого сопротивления, и плечи моста не содержат уравнивающих элементов. Неуравновешенные мосты широко используются в различных типах преобразователей неэлектрических величин. Мост на рис. 7.7 будет неуравновешенным, если три его плеча  $R_1, R_2, R_3$  образованы резисторами с постоянным сопротивлением, а в четвертое плечо включен измеряемый резистор  $R_x$  (в мостовых измерительных схемах термометров это  $R$ ). При постоянном напряжении  $U_{пит}$  с изменением сопротивления  $R_x$  изменяется напряжение  $U_{вых}$  в измерительной диагонали. По известной градуировочной характеристике  $U_{вых} = f(R_x)$  можно определить значение  $R_x$ . При необходимости шкала измерительного прибора ИП (например, милливольтметра) может быть отградуирована в единицах сопротивления, температуры или другой величины.

На значение выходного напряжения моста  $U_{вых}$  влияют не только сопротивления плеч, но так же сопротивление диагонали питания (включая внутреннее сопротивление источника) и измерительной диагонали (включая входное сопротивление измерительного прибора). При анализе схемы можно предположить, что внутреннее сопротивление источника питания равно нулю, а входное сопротивление измерительного прибора очень велико и ток в измерительной диагонали близок к нулю. В этом случае  $U_{вых} = R_x I_2 - R_1 I_1$ , поскольку  $I_1 = U_{пит} / (R_x + R_3)$  и  $I_2 = U_{пит} / (R_1 + R_2)$ , то получаем следующую зависимость между выходным напряжением  $U_{вых}$  и измеряемым сопротивлением  $R_x$ :

$$U_{вых} = U_{пит} (R_x R_2 - R_1 R_3) / [(R_x + R_3)(R_1 + R_2)]. \quad (7.12)$$

Числитель (7.12) представляет разность произведений противоположных плеч моста, т.е. отклонение от условия равновесия. С ростом последнего увеличивается  $U_{вых}$ .

Из выражения (7.12) видны недостатки неуравновешенного моста:

- нелинейная статическая характеристика  $U_{вых} = f(R_x)$ ;
- зависимость  $U_{вых}$  от напряжения питания  $U_{пит}$ , что требует стабилизации  $U_{пит}$ ;

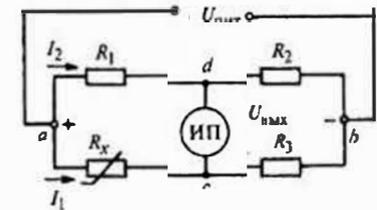


Рис. 7.7. Схема неуравновешенного моста

• погрешность неуравновешенного моста не может быть меньше погрешности прибора, измеряющего  $U_{\text{вых}}$ .

Мосты рассчитываются таким образом, чтобы при значении  $R_x$ , соответствующем нижнему пределу измерения, выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  было бы равно нулю. Например, если диапазон измерения моста  $(-50 \dots 50)^\circ\text{C}$ , то  $U_{\text{вых}} = 0$  при значении  $R_x$ , которое оно имеет при  $-50^\circ\text{C}$  (например, для ТСП 50П при  $t = -50^\circ\text{C}$   $R_t = 39,99$  Ом). Для установки нуля используется корректор нуля — резистор, включенный в любую из вершин моста (например, точка  $a$  на схеме рис. 7.7). Если измеряемое сопротивление представляет собой терморезистор, подключенный по двухпроводной схеме, то (7.12) записывается в виде

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{(R_t + 2R_n)R_2 - R_1R_3}{(R_t + 2R_n + R_3)(R_1 + R_2)} \quad (7.13)$$

При подводе питания не к точке  $a$ , а непосредственно к зажиму термопреобразователя (трехпроводная схема) зависимость выходного напряжения от  $R_t$  будет иметь вид:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{(R_t + R_n)R_2 - R_3(R_1 + R_n)}{(R_t + R_n + R_3)(R_1 + R_2 + R_n)} \quad (7.14)$$

Сопоставление выражений (7.13) и (7.14) показывает, что как и для уравновешенного моста изменение плеч моста при использовании трехпроводной схемы подключения  $R_t$  приводит к снижению влияния изменения сопротивления линий связи на  $U_{\text{вых}}$ .

Схема промышленного неуравновешенного моста Ш-4540/1 для измерения сопротивления термопреобразователя изображена на рис. 7.8.

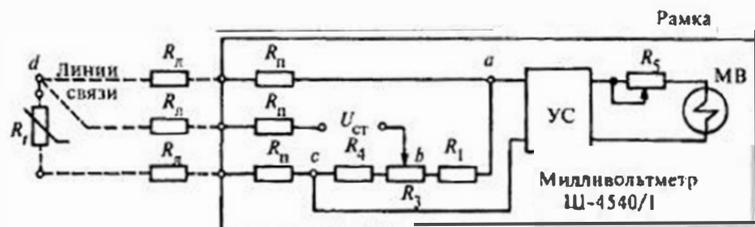


Рис. 7.8. Схема измерителя Ш-4540/1

Схема представляет собой неуравновешенный мост, плечами моста являются резисторы между точками  $d-a$ ;  $a-b$ ;  $b-c$ ;  $c-d$ . Термопреобразователь  $R_t$  включен по трехпроводной схеме,  $R_n$  — резисторы для подгонки сопротивлений линий. Подгонка сопротивлений осуществляется у всех трех линий, хотя в уравнении (7.14) сопротивление линии диагонали питания отсутствует. Это связано с тем, что реально сопротивление диагонали питания не равно нулю. Питание осуществляется от стабилизированного источника питания, резистор  $R_3$  — корректор нуля, резистор  $R_5$  — корректор чувствительности. Напряжение разбаланса поступает на усилитель УС, к выходу которого подключен милливольтметр МВ со шкалой, отградуированной в градусах Цельсия.

### 7.1.3. Логометры

Магнитоэлектрический логометр является одним из средств измерения, применяемых в комплекте с техническими термопреобразователями сопротивления для измерения температуры. Принцип действия логометра основан на измерении отношения токов в двух электрических цепях. В одну из них включен термопреобразователь сопротивления, а в другую — резистор с постоянным сопротивлением. На рис. 7.9 представлена схема магнитоэлектрического логометра, состоящего из двух рамок: компенсирующей 1 и рабочей 2, жестко скрепленных друг с другом и со стрелкой 3 и помещенных в воздушном зазоре между полюсными наконечниками 4 и 5 постоянного магнита и неподвижным сердечником 6 (это условная схема удобна для понимания принципа действия).

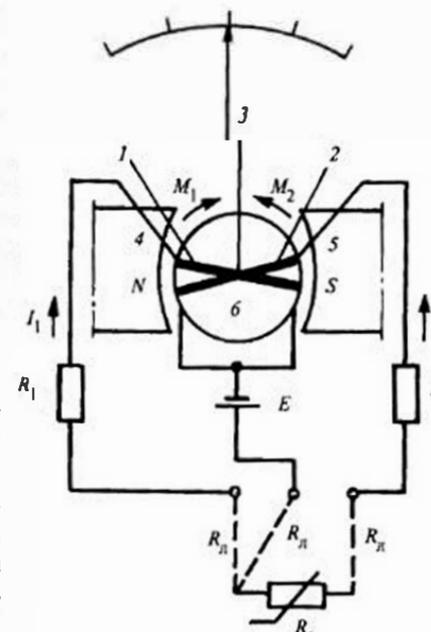


Рис. 7.9. Трехпроводная схема подключения ТС к логометру:  
1, 2 — компенсирующая и рабочая рамки;  
3 — стрелка; 4, 5 — полюсные наконечники постоянного магнита; 6 — неподвижный сердечник

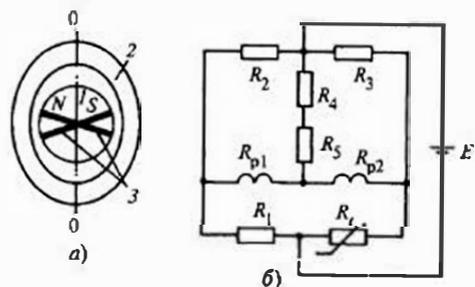


Рис. 7.10. Схемы логометра:  
а — магнитной системы; б — измерительная

Реальная схема магнитной системы приведена на рис. 7.10. Зазор между полюсными наконечниками и сердечником сделан неравномерным, и поэтому значение магнитной индукции в разных точках зазора (при различном угле поворота рамок и стрелки) будет различным.

Воздушный зазор от центра к краям полюсных наконечников увеличивается и соответственно от центра к краям полюсных наконечников уменьшается магнитная индукция в зазоре.

Принципиально важно, что магнитное поле в зазоре неоднородно. Оно может увеличиваться от центра к краям, либо уменьшаться. В рассматриваемом случае принят второй вариант. 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  $M_2$  можно определить из выражений:

момент компенсирующей рамки

$$M_1 = k_1 B_1 I_1;$$

момент рабочей рамки

$$M_2 = k_2 B_2 I_2,$$

где  $B_1$ ,  $B_2$  — индукции в месте расположения рамок 1 и 2;  $k_1$ ,  $k_2$  — коэффициенты, зависящие от размеров рамок и числа витков.

Рамки у логометров одинаковые, поэтому  $k_1 = k_2 = k$ . Подвижная система находится в равновесии, когда моменты  $M_1 = M_2$ , тогда

$$B_1 I_1 = B_2 I_2 \text{ или } \frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2}{B_1}.$$

Отношение магнитных индукций  $B_2/B_1$  для конкретной конструкции логометра зависит от положения рамок, т.е. однозначно определяется углом их поворота  $\varphi$ :

$$\frac{B_2}{B_1} = f(\varphi).$$

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

Обе ветви электрической цепи питаются параллельно от одного источника питания  $E$ . Сопротивление одной из ветвей состоит из сопротивления компенсирующей рамки  $R_{p1}$  и сопротивления добавочного резистора  $R_1$ . Ток в этой ветви

$$I_1 = \frac{E - R_n(I_1 + I_2)}{R_{p1} + R_1 + R_n}.$$

Сопротивление другой ветви включает сопротивление второй рамки  $R_{p2}$ , сопротивление добавочного резистора  $R_2$  и сопротивление термопреобразователя  $R_r$ . С учетом сопротивления подводящего провода ток во второй ветви вычисляется по формуле

$$I_2 = \frac{E - R_n(I_1 + I_2)}{R_{p2} + R_2 + R_r + R_n}.$$

Отношение токов определяется отношением

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{p2} + R_2 + R_r + R_n}{R_{p1} + R_1 + R_n}.$$

Если сопротивления  $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_n$  остаются постоянными, то можно написать, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \varphi(R_r).$$

или

$$\varphi = F(R_r).$$

Таким образом, угол поворота подвижной системы, при котором моменты  $M_1$  и  $M_2$  будут равными (положение равновесия системы), зависит от сопротивления термопреобразователя и не зависит от напряжения питания.

Положим, что подвижная система логометра находилась в равновесии, а затем увеличилась измеряемая температура. Изменение температуры вызовет соответствующее увеличение сопротивления термопреобразователя, а это в свою очередь вызовет уменьшение тока  $I_2$  и, следовательно, увеличение отношения токов  $I_1/I_2$ . При уменьшении тока  $I_2$  уменьшается момент  $M_2$  и рамки начнут пово-

рачиваться по часовой стрелке, так как в первый момент  $M_1 > M_2$ . В этом случае компенсирующая рамка (с моментом  $M_1$ ) входит в более слабое магнитное поле, момент  $M_1$  начинает уменьшаться. Рабочая рамка при повороте входит в более сильное магнитное поле, при этом  $M_2$  будет увеличиваться. При достижении равенства  $M_1 = M_2$  подвижная система остановится и восстановится равенство

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2}{B_1}.$$

Из приведенных формул следует, что изменение напряжения питания  $E$  не должно влиять на показания логометра, так как при этом не изменяется отношение токов  $I_1/I_2$ . В реальных условиях на значения токов  $I_1$  и  $I_2$  будут влиять сопротивления рамок  $R_{p1}$  и  $R_{p2}$  и соединительных проводов между термопреобразователем  $R_r$  и зажимами логометра. Для уменьшения влияния изменения сопротивления соединительных проводов используется трехпроводная схема подключения термопреобразователя (см. рис. 7.9). При выводе уравнений не учитывались моменты сопротивления токоподводов и возвратной пружины. Последняя устанавливается для возврата стрелки к началу шкалы при снятии напряжения питания. При учете всех этих факторов оказывается, что изменение напряжения питания несколько влияет на показание логометра. Поэтому изменение напряжения питания обычно допускается в пределах  $\pm 20\%$ . Для уменьшения влияния изменения сопротивления рамок используется симметричная мостовая схема, изображенная на рис. 7.10, б. Уменьшение влияния температуры на показания прибора осуществляется введением в схему медного резистора  $R_4$ . На рис. 7.10, а изображена применяемая в настоящее время магнитная система с внутримрамочным магнитом. Магнитная нейтраль проходит по линии 0—0. Обычно класс логометров равен 1,5.

#### 7.1.4. Преобразователи с унифицированным токовым выходным сигналом для ТС

Нормирующие преобразователи предназначены для преобразования естественных сигналов от преобразователей температуры (термопреобразователей сопротивления или термопар) в унифицированный выходной сигнал 0...5; 0...20; 4...20 мА, 0...10 В. Преобразование может осуществляться либо в отдельном приборе — *нормирующем преобразователе*, либо в устройстве унификации,

расположенном непосредственно в головке термопреобразователя. Такие термопреобразователи называются *термопреобразователями с унифицированным выходным сигналом* и в их обозначении обычно присутствует буква У, например ТСМУ, ТХАУ.

Основным требованием, предъявляемым к нормирующим преобразователям, является постоянство коэффициента преобразования. Для обеспечения этого требования в электронной технике применяются отрицательные обратные связи. Их роль в стабилизации коэффициента передачи и изменении диапазона измерения преобразователя рассмотрим применительно к простейшему устройству с отрицательной обратной связью, схема которого представлена на рис. 7.11. Преобразователь предназначен для преобразования сигнала  $U_x$  в пропорциональный токовый выходной сигнал  $I$ . В состав преобразователя входит усилитель  $У$  с бесконечно большим коэффициентом усиления  $k_y$ . Входная цепь усилителя включает источник измеряемого сигнала  $U_x$  и сопротивление отрицательной обратной связи, по которому протекает выходной ток  $I$ . Выходная цепь преобразователя между точками а, б включает миллиамперметр мА, сопротивление нагрузки  $R_n$  (суммарное сопротивление всех элементов, входящих в выходную цепь преобразователя) и сопротивление отрицательной обратной связи  $R_{o.c}$ . Таким образом,  $R_{o.c}$  входит в выходную и входную цепи преобразователя.

Обратной связью называют воздействие последующего элемента на предыдущий. Обратная связь является отрицательной, если сигнал последующего элемента вычитается из сигнала предыдущего элемента. В данном случае используется отрицательная обратная связь и сигнал на входе усилителя  $\Delta U = U_x - U_{o.c} = U_x - R_{o.c}I$ . С учетом введенных обозначений выходное напряжение усилителя  $U_{вых} = k_y \Delta U = k_y(U_x - R_{o.c}I) = I(R_n + R_{o.c})$ . Если  $I = k_{np}U_x$ , то коэффициент преобразования такого устройства составит

$$k_{np} = I/U_x = k_y/(R_n + R_{o.c} + k_y R_{o.c}) = 1/[(R_n + R_{o.c})/k_y + R_{o.c}].$$

При  $k_y \rightarrow \infty$  ( $(R_n + R_{o.c})/k_y \rightarrow 0$ ),  $k_{np} = 1/R_{o.c}$  и  $U_x \approx R_{o.c}I$ ,  $\Delta U \rightarrow 0$ , но  $\Delta U \neq 0$ , так как  $U_{вых} = k_y \Delta U$ . Чем больше  $k_y$ , тем меньше сигнал небаланса на входе усилителя. Если измеряемый сигнал составляет

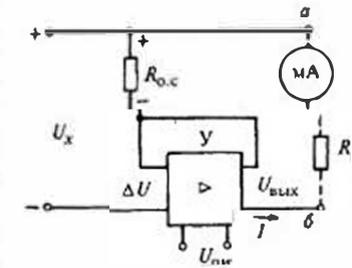


Рис. 7.11. Схема преобразователя с отрицательной обратной связью

десятки милливольт, то  $\Delta U$  — микровольты. Таким образом, в преобразователях с глубокой отрицательной обратной связью измеряемый сигнал является задающим, изменения которого отслеживаются напряжением обратной связи, а следовательно, и током  $I$ , поскольку  $R_{о.с}$  является постоянной величиной. Допустим, что при наличии некоторого установившегося режима возросло  $U_x$ , при этом в первый момент увеличивается  $\Delta U$ , что приводит к росту  $U_{вых}$  и выходного тока  $I$  до величины, при которой сигнал обратной связи  $R_{о.с}I$  практически компенсирует измеряемый  $U_x$ .

Изменения характеристик элементов преобразователя, охваченных обратной связью, практически, не оказывают влияния на коэффициент преобразования. Предположим, что из-за колебаний напряжения питания  $U_{пит}$  или изменения характеристик элементов усилителя несколько понизился  $k_u$ , оставаясь при этом достаточно большим, это приведет к некоторому увеличению  $\Delta U$ , но равенство  $U_x = R_{о.с}I$  фактически сохранится. Последнее имеет место и при изменениях сопротивления нагрузки  $R_n$ . Допустим, что в какой-то момент возросло  $R_n$ , при этом снижаются выходной ток и напряжение обратной связи, возрастают  $\Delta U$ ,  $U_{вых}$  и восстанавливается выходной ток  $I$  до значения, соответствующего  $U_x$ . Все рассмотренные процессы восстановления тока при изменениях влияющих величин протекают, практически, мгновенно и их можно заметить только на экране осциллографа. В технической документации на преобразователи даются ограничения на области изменения влияющих величин. Так, при выходном сигнале 0...5 мА сопротивление нагрузки может меняться в пределах 0...2,5 кОм, а при токе 4...20 мА оно не должно превышать 1 кОм.

Поскольку во входной цепи усилителя токи определяются действующим напряжением, то при  $\Delta U \rightarrow 0$  они пренебрежимо малы. В связи с этим, измерительные преобразователи с глубокими отрицательными обратными связями относятся к устройствам, реализующим компенсационный метод измерения, и обладают положительными чертами этого метода:

- на результат преобразования не влияет сопротивление источника сигнала и линий связи;
- входное сопротивление преобразователя стремится к бесконечности;
- диапазон преобразования легко устанавливается изменением значения  $R_{о.с}$ ;

• характеристики элементов, охваченных отрицательной обратной связью, не влияют на коэффициент преобразования: в значительном диапазоне могут меняться коэффициент усиления усилителя  $k_u$  и сопротивление нагрузки  $R_n$ .

Рассмотренные автоматические уравновешенные мосты и потенциометры также относятся к устройствам с отрицательными обратными связями, но тип этих связей несколько иной, благодаря наличию реверсивного двигателя. В этих приборах в режиме компенсации сигнал на входе усилителя имеет произвольное значение в пределах зоны нечувствительности. В нормирующих преобразователях он хоть и пренебрежимо мал, но меняется пропорционально измеряемому сигналу  $U_x$ .

Реальные нормирующие преобразователи значительно сложнее рассмотренного устройства, поскольку включают элементы гальванического разделения цепей, фильтры, устройства температурной компенсации, источники стабилизированного тока и напряжения и пр.

Диапазоном преобразования нормирующих преобразователей называется тот температурный диапазон, в пределах которого выходной ток (или напряжение) устанавливается в нормированном диапазоне. Например, преобразователь с диапазоном  $-50...50$  °С НСХ 50П с диапазоном выходного тока 4...20 мА должен иметь выходной ток 4 мА при измеряемой температуре  $-50$  °С и 20 мА при температуре 50 °С. Нормирующие преобразователи для ТС и ТЭП различаются только входными измерительными схемами.

Структурная схема нормирующего преобразователя для ТС представлена на рис. 7.12. Преобразователь имеет измерительный мост ИМ, в одно из плеч которого по трехпроводной схеме включен термопреобразователь сопротивления ТС. Этот мост относится к типу неуравновешенных мостов, поэтому он питается стабилизированным напряжением  $U_{ст}$ . С помощью корректора нуля  $R_3$  измерительный мост уравновешивается на нижнем пределе измерения, при этом его выходное напряжение  $U_{им}$  равно нулю. При увеличении



Рис. 7.12. Структурная схема нормирующего преобразователя для ТС

измеряемой температуры сопротивление термопреобразователя  $R_t$  увеличивается, мост выходит из равновесия и на выходе моста появляется отличное от нуля измеряемое напряжение  $U_{им}$ . Чем выше измеряемая температура, тем больше сопротивление  $R_t$ , тем больше разбаланс моста и тем больше напряжение  $U_{им}$ , поступающее на входной усилитель  $УС_{вх}$ . Его выходное напряжение изменяется в пределах (0...1) В, независимо от пределов измерения (напряжение равно нулю на нижнем пределе измерения и равно 1 В — на верхнем). Следующей ступенью является устройство гальванического разделения входных и выходных цепей УГР (это повышает помехозащищенность преобразователя),  $\Phi$  — фильтр, обеспечивающий подавление помехи переменного напряжения. К выходу последнего подключен выходной усилитель, обеспечивающий преобразование своего входного сигнала в унифицированный выходной сигнал тока или напряжения (на рис. 7.12 изображена схема для токового выходного сигнала).  $УС_{вых}$  представляет собой дифференциальный усилитель, на вход 1 которого поступает напряжение  $U_1$  от фильтра  $\Phi$  (пропорциональное измеряемому сопротивлению  $R_t$ ), а на вход 2 — напряжение с резистора обратной связи  $R_{о.с}$ , равное ( $I_{вых}R_{о.с}$ ). Усилитель с большим коэффициентом усиления реагирует на разностный сигнал

$$\Delta U = U_1 - I_{вых}R_{о.с}$$

и устанавливает такой ток, при котором  $\Delta U \approx 0$  и  $I_{вых}/U_1 = 1/R_{о.с}$ .

Термопреобразователи с унифицированным выходным сигналом 18...36 В (работающих с блоками питания БПД-40 или БП-96) и в искробезопасном исполнении снабжаются барьерами искрозащиты. Технические характеристики некоторых типов нормирующих преобразователей приведены в табл. 7.3. Технические данные термопреобразователей сопротивления со встроенными в головку нормирующими преобразователями приведены в табл. 5.1.

В интеллектуальных нормирующих преобразователях для линеаризации характеристики ТС, усреднения, установления диапазона измерения, диагностики состояния используются микропроцессоры. Универсальные измерительные преобразователи SITRANS T фирмы Siemens, структурная схема которых представлена на рис. 7.13, могут работать как с ТС, так и с ТЭП. При подключении двух ТС может вычисляться средняя температура или их разность. Стабилизированный ток для питания ТС подается от источника тока ИТ. Сигнал термопреобразователя после мультиплексора (переключателя) М поступает на усилитель У, аналого-цифровой преобразователь АЦП

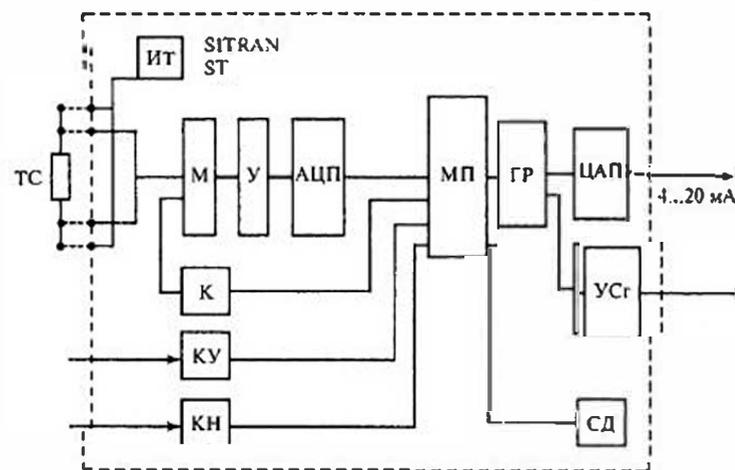


Рис. 7.13. Структурная схема универсального измерительного преобразователя

и микропроцессор МП. Его импульсный выходной сигнал со скважностью, пропорциональной измеряемому сигналу (4700 имп/диап. изм), проходит через цепь гальванического разделения ГР и цифроаналоговый преобразователь ЦАП. При выходном токе 4...20 мА преобразователь подключается к внешней цепи по двухпроводной линии и по четырехпроводной при токе 0...5; 0...20 мА. В последнем случае два провода используются для подключения внешнего источника питания. Устройство сигнализации отклонения измеряемой величины УСг может быть релейным или электронным. При нормальной работе преобразователя светодиод СД горит ровным светом, а при нарушениях — мигающим.

Для периодического контроля дрейфа прибора и коррекции его характеристики используется цепь К, программирование преобразователя и опрос параметров производится по цифровому каналу управления КУ от ПК по интерфейсу RS-232, рассмотренному в § 8.3. Корректор начального сигнала КН используется для учета сопротивления линий связи при двухпроводной схеме подключения ТС. Преобразователи могут работать с термопреобразователями Pt100, Cu100 и Ni100. Для пределов измерения от -200 до 850 °С погрешность преобразователя при точной коррекции составляет  $\pm(0,06...0,75)$  °С. Преобразователи имеют конструктивные исполнения для монтажа на несущей шине и в плоском варианте как съемные модули, помещаемые в держатели модулей.

## 7.2. Средства измерения и преобразования термоЭДС

### 7.2.1. Пирометрические милливольтметры

Простейшим средством измерения термоЭДС является милливольтметр. Милливольтметры — приборы магнитоэлектрической системы (рис. 7.14). Принцип их действия основан на взаимодействии тока  $I$ , протекающего через подвижную рамку прибора  $1$ , с полем постоянного магнита  $2$ . Полусные накопечники  $3$  выполняются концентрически с неподвижным сердечником  $4$ , вокруг которого вращается рамка  $1$ . При постоянном зазоре между полусными накопечниками  $3$  с сердечником  $4$  индукция  $B$  в зазоре постоянна и действующий на рамку вращающий момент определяется уравнением

$$M_{вр} = 2nlrBI,$$

где  $n$  — число витков в рамке;  $l, r$  — активная длина и радиус рамки.

Для измерения  $M_{вр}$  и получения пропорционального ему поворота показывающей стрелки, соединенной с рамкой  $1$ , используется пружина  $5$ . Один ее конец соединен с неподвижным сердечником  $4$ , а другой — с рамкой  $1$ . Закручивание пружины на угол  $\varphi$  создает противодействующий момент  $M_{пр}$ , пропорциональный  $\varphi$ . В равновесном состоянии рамки  $M_{вр} = M_{пр}$ ,  $2nlrBI = c\varphi$ , откуда  $\varphi = 2nlrBI/c$ . При постоянном внутреннем сопротивлении милливольтметра между напряжением на его зажимах и током, протекающем через рамку, существует однозначное соответствие, что позволяет прибор градуировать в единицах напряжения. Если милливольтметры предназначены для измерения термоЭДС, то они обычно градуируются в  $^{\circ}\text{C}$  и называются пирометрическими. Для установления однозначного соответствия между показаниями температуры в  $^{\circ}\text{C}$ , ЭДС, развиваемой термопарой, и протекающим через милливольтметр током на шкале прибора указываются градуировка термопары и значение внешнего сопротивления на зажимах милливольтметра.

Милливольтметр Ш-4540, схема которого представлена на рис. 7.15, имеет встроенный мост  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_m$ . Одно из плеч моста образовано медным резистором  $R_m$ , равным 10 Ом при  $0^{\circ}\text{C}$ . Остальные резисторы подбираются таким образом, чтобы мост

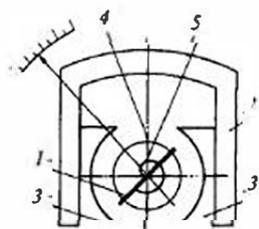


Рис. 7.14. Схема милливольтметра:  
1 — рамка; 2 — постоянный магнит; 3 — полусные накопечники; 4 — неподвижный сердечник; 5 — пружина

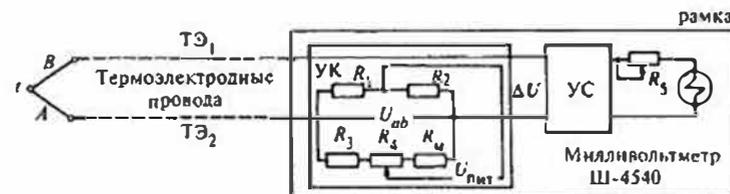


Рис. 7.15. Схема пирометрического милливольтметра Ш-4540

вырабатывал определенное напряжение  $U_{ab}$ , компенсирующее напряжение термопары на нижнем пределе измерения. Например, при нижнем пределе  $0^{\circ}\text{C}$  мост должен быть сбалансирован при  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$  для всех НСХ ТЭП, для диапазона  $(200 \dots 600)^{\circ}\text{C}$  НСХ ХК при  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$   $U_{ab} = 14,52$  мВ. Термопара подключается к милливольтметру удлиняющими термоэлектродными проводами, ее свободные концы находятся внутри прибора и имеют ту же температуру, что и  $R_m$ . Принцип введения поправки рассмотрен в § 6.3.

В данной схеме на вход усилителя поступает разностный сигнал

$$\Delta U = E(t, t_0) - U_{ab0}$$

где  $U_{ab0}$  — напряжение  $U_{ab}$  при  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ . При нулевом нижнем пределе измерения и  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$   $U_{ab0} = 0$ , а при ненулевом (например,  $200^{\circ}\text{C}$ ) и  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$   $U_{ab0} = E(200, 0)$ . К выходу усилителя подключен магнитоэлектрический милливольтметр МВ, стрелка которого в этом случае будет стоять на начальной отметке, соответствующей  $200^{\circ}\text{C}$ . Если  $t_0$  увеличится до  $50^{\circ}\text{C}$ , то  $E(t, t_0)$  и  $U_{ab}$  уменьшаются

$$\Delta U = E(200, 0) - E(50, 0) - (U_{ab0} - \Delta U_{ab}).$$

Если  $\Delta U_{ab} = E(50, 0)$ , то  $\Delta U$  не изменится.

### 7.2.2. Потенциометры

Потенциометры широко применяются для измерения термоЭДС в лабораторных и промышленных условиях. Лабораторные потенциометры имеют класс точности от 0,05 до 0,005 и используются в качестве образцовых средств измерений как при поверке милливольтметров и автоматических потенциометров, так и при выполнении научных исследований. В потенциометрах реализуется компенсационный метод измерения напряжения, обеспечивающий малую погрешность измерения при использовании известного с высокой

точностью компенсирующего сигнала и чувствительного индикатора рассогласования (нуль-прибора).

**Лабораторные потенциометры.** На рис. 7.16 изображена упрощенная схема лабораторного потенциометра с постоянной силой рабочего тока. Ее рассмотрение позволяет разобрать основные черты компенсационного метода измерения термоЭДС, которые характерны и для автоматических потенциометров. Схема рассматриваемого прибора содержит три контура: А — рабочего тока  $I$ ; В — нормального элемента НЭ; С — измеряемого сигнала  $E(t, t_0)$ .

В контур рабочего тока входят источник питания ИП, реостат регулировки тока  $R_r$ , контрольное сопротивление  $R_k$  и реохорд  $R_p$ . Высокочувствительный гальванометр НП, выполняющий функции нуль-прибора, подключается в положении К переключателя П к цепи нормального элемента, а в положении И — к цепи измеряемого сигнала.

Одним из основных факторов, определяющих высокую точность измерения напряжения, является обеспечение постоянства рабочего тока строго определенного значения. Для контроля за значением рабочего тока используется электрохимический нормальный элемент, который является источником высокостабильной ЭДС, составляющей 1,086 В. Нормальные элементы даже кратковременно нельзя

нагружать током более 1 мкА. Для установки рабочего тока выполняется операция контроля, при которой замыкается цепь нормального элемента. Ток через нуль-прибор будет отсутствовать ( $I_{нп} = 0$ ), если  $E_{нэ} = IR_k$ . При выполнении этого условия рабочий ток составит  $I = E_{нэ}/R_k$ . Если при операции контроля рабочего тока нуль-прибор показывает наличие тока ( $I_{нп} \neq 0$ ), то установка требуемого значения рабочего тока, при котором  $I_{нп} = 0$ , производится изменением сопротивления  $R_r$ .

После установления рабочего тока нуль-прибор подключают к цепи измеряемого сигнала, переместив переключатель «П» в положение «И». Реохорд служит делителем напряжения. Если движок реохорда находится в крайнем левом положении, то  $m = 0$ ,

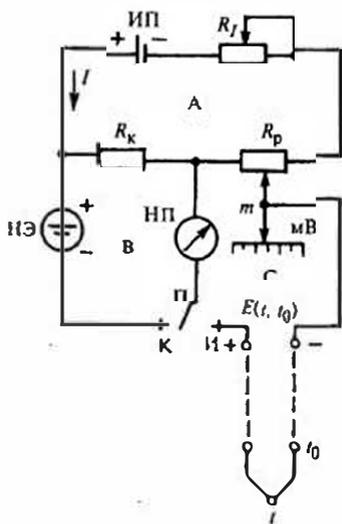


Рис. 7.16. Схема лабораторного потенциометра с постоянной силой рабочего тока

и снимаемый с реохорда сигнал  $mR_p I = 0$ , в крайнем правом положении  $m = 1$  и снимаемый с реохорда сигнал составит  $R_p I$ . При произвольном положении движка реохорда этот сигнал составляет  $mR_p I$ . С движком реохорда связана показывающая стрелка, что позволяет при известном токе  $I$  шкалу потенциометра проградуировать в мВ. При измерении напряжения ток через нуль-прибор будет отсутствовать ( $I_{нп} = 0$ ), если  $E(t, t_0) = mR_p I$ . В противном случае, если  $I_{нп} \neq 0$ , то перемещают движок реохорда в такое положение, при котором выполняется равенство  $I_{нп} = 0$  и  $E(t, t_0) = mR_p I$ . Последнее уравнение называют уравнением компенсации.

В момент компенсации нет тока в цепи источника измеряемого сигнала, из чего следует:

- отсутствие влияния внешнего сопротивления  $R_{вн}$  (внутреннее сопротивление источника измеряемого сигнала и сопротивление линий связи) на показание потенциометра;
- бесконечно большое входное сопротивление потенциометра в момент компенсации сигналов.

Чувствительность потенциометра зависит от чувствительности нуль-прибора и величины тока, протекающего через него при наличии небаланса напряжений в цепи С. Ток небаланса определяется выражением

$$I_{нп} = [E(t, t_0) - mR_p I] / (R_{нп} + mR_p + R_{вн}) \quad (7.15)$$

Выражение (7.15) говорит о том, что с ростом сопротивления линий связи и внутреннего сопротивления источника сигнала (сопротивление внешней цепи  $R_{вн}$ ) чувствительность потенциометра снижается, растет погрешность. В связи с этим в технической документации обычно указывается область допустимых значений сопротивления внешней цепи потенциометра.

Автоматические потенциометры типа КСП предназначены для автоматического измерения термоЭДС преобразователей компенсационным методом. Измеряемая термоЭДС компенсируется (уравновешивается) напряжением между точками  $a$  и  $b$  измерительной схемы (рис. 7.17):  $E(t, t_0) = U_{ab}$ . Основным элементом измерительной схемы потенциометра является реохорд  $R_p$  — проволочный резистор строго определенного сопротивления (обычно 90 Ом), равномерно распределенного на длине, равной длине шкалы потенциометра (например, 100 мм у КСП1 и 160 мм у КСП2). По реохорду реверсивным двигателем РД передвигается движок, жестко сочлененный со стрелкой, перемещающийся вдоль неподвижной шкалы. Через реохорд

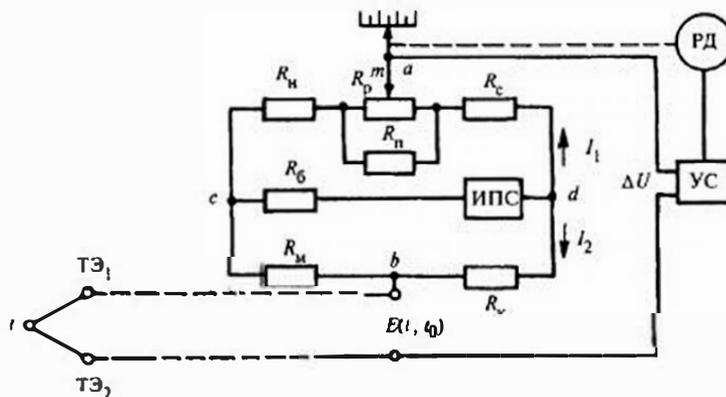


Рис. 7.17. Схема автоматического потенциометра

пропускается постоянный ток от стабилизированного источника ИПС. Точка  $a$  является точкой контакта движка с проволочной намоткой реохорда. Поскольку через реохорд проходит ток, то потенциал точки  $a$  будет зависеть от положения движка, т.е. от положения стрелки на шкале. Например, при смещении движка справа налево потенциал точки  $a$  уменьшается (так как движение осуществляется по направлению тока  $I_1$ ).

Предположим, вначале, что потенциал точки  $b$  не изменяется. ТЭП включается таким образом, чтобы термоЭДС  $E(t, t_0)$  и напряжение  $U_{ab}$  вычитались. Их разность

$$\Delta U = E(t, t_0) - U_{ab}$$

является входным напряжением усилителя УС. Реверсивный (т.е. способный вращаться в разные стороны в зависимости от знака  $\Delta U$ ) двигатель, подключенный к выходу усилителя установит движок в такое положение, при котором  $\Delta U = 0$  и что достижении этого положения остановится (так как исчезнет  $\Delta U$ , а следовательно, и напряжение в управляющей обмотке двигателя).

Новое изменение измеряемой температуры  $t$  вызовет изменение  $E(t, t_0)$ , и появление  $\Delta U$  (разбаланс схемы). Это вновь приведет к включению двигателя РД и перемещению движка и стрелки до положения, при котором  $\Delta U = 0$ . Шкала потенциометра может быть градуирована либо в милливольтгах, либо в градусах. В последнем случае на шкале указывается обозначение номинальной статической характеристики ТЭП (градуирован), например  $(0 \dots 600)^\circ\text{C}$  НСХ ХК(L).

Предположим, что измеряемая температура осталась неизменной, а температура свободных концов возросла. При этом термоЭДС преобразователя уменьшится (если измеряемая температура больше  $0^\circ\text{C}$ ), т.е. на вход потенциометра поступит меньшее напряжение  $E(t, t_0)$ . Однако показания потенциометра при этом изменяться не должны (ведь он должен показывать значение измеряемой температуры, а оно не изменилось), т.е. положение движка реохорда и потенциал точки  $a$  должны остаться неизменными. В то же время, чтобы положение движка не изменилось, нужно, чтобы напряжение на входе усилителя  $\Delta U$  осталось нулевым, а для этого необходимо, чтобы напряжение  $U_{ab}$  уменьшилось для сохранения равенства  $E(t, t_0) = U_{ab}$ .

Следовательно, возникает вопрос: как уменьшить  $U_{ab}$  не изменяя потенциала точки  $a$ . Ответ может быть только одним — изменить потенциал точки  $b$ .

Таким образом, для автоматического введения поправки на изменение температуры свободных концов нужно, чтобы с изменением температуры свободных концов изменялся потенциал точки  $b$ . Это изменение должно быть равным  $E(t_0, 0)$ .

Итак, принципиальная разница введения поправок на изменение  $t_0$  в схемах компенсаторов и в потенциометрах следующая. Мостовые схемы компенсаторов вырабатывают напряжение, равное  $E(t_0, 0)$ , которое складывается с ЭДС термопары так, что на вход измерительного прибора поступает дополнительное напряжение, равное  $E(t_0, 0)$ . В потенциометрических схемах на  $E(t_0, 0)$  уменьшается компенсирующее напряжение  $U_{ab}$ . Каким образом уменьшается  $U_{ab}$  при увеличении  $t_0$  (см. рис. 7.17)? Напряжение  $U_{cd}$  между точками  $c$  и  $d$ , создаваемое стабилизатором ИПС, делится делителем, состоящим из резисторов  $R_M$  и  $R_X$ , причем точка  $b$  — это точка между этими резисторами. Потенциал точки  $b$  зависит от соотношения сопротивления этих резисторов, поэтому задачу введения поправки на  $t_0$  можно сформулировать так: нужно, чтобы при увеличении температуры свободных концов  $t_0$  сопротивление одного из резисторов ( $R_M$  или  $R_X$ ) изменялось бы так, чтобы потенциал точки  $b$  увеличился на значение  $E(t_0, 0)$ . В реальных схемах это обеспечивается увеличением сопротивления резистора  $R_M$  при увеличении температуры свободных концов.

Итак, с увеличением температуры свободных концов  $t_0$  сопротивление резистора  $R_m$  должно увеличиваться. Поэтому эти резисторы обычно изготавливаются из медной проволоки. Кроме того, из изложенного следует, что температура медного резистора всегда должна быть равна температуре свободных концов ТЭП  $t_0$ . Для обеспечения этого ТЭП подключается к потенциометру удлиняющими термоэлектродными проводами ТЭ<sub>1</sub> и ТЭ<sub>2</sub>. В этом случае температура медного резистора всегда будет равна температуре свободных концов  $t_0$ .

Если потенциометр используется как электроизмерительный прибор-милливольтметр, то вводить поправку не нужно. В этом случае вместо медного резистора устанавливается проволочный резистор из манганина — материала, сопротивление которого не зависит от температуры. Если в измерительную цепь термодпары включено устройство компенсации мостового типа, то схема потенциометра также не должна содержать медный резистор  $R_m$  — вместо него должен устанавливаться манганиновый.

Назначение резисторов потенциметрической схемы КСП следующее:

$R_{II}$  — резистор для установки начала шкалы;

$R_{II}$  — резистор, определяющий диапазон измерения;

$R_k$  — контрольный резистор для проверки рабочего тока  $I_2 = 2$  мА (для всех потенциометров серии КС  $R_k = 509,5$  Ом);

$R_m$  — медный резистор для введения поправки на изменение температуры свободных концов;

$R_c$  — резистор для установки рабочего тока  $I_1 = 3$  мА;

$R_6$  — нагрузочный резистор стабилизатора ИПС.

Для всех потенциометров КПП, КСП  $I_1 = 3$  мА,  $I_2 = 2$  мА. В дальнейшем считаем, что для всех потенциометров сопротивление реохорда  $R_p = 90$  Ом и нерабочие участки реохорда отсутствуют (движок реохорда не должен устанавливаться на крайние витки намотки во избежание повреждения реохорда. Поэтому, всегда есть нерабочие участки реохорда по концам намотки, куда движок не заходит). Параллельное соединение  $R_p$  и  $R_{II}$  называется приведенным сопротивлением реохорда и обозначается  $R_{np}$ :

$$R_{np} = \frac{R_p R_{II}}{R_p + R_{II}}$$

Составим несколько уравнений, важных для анализа потенциметрической схемы, применяя второй закон Кирхгофа для замкнутой цепи: «в замкнутом контуре алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений». Для составления уравнений нужно совершить обход контура, задавшись любым направлением. При этом, если направление обхода не совпадает с направлением ЭДС или направлением тока, то значения ЭДС и падения напряжения входят в уравнение со знаком минус. Положительным считается направление ЭДС, если при обходе входим в отрицательный полюс источника и выходим из положительного (см. рис. 7.17). На схеме начальная отметка шкалы находится слева. Буквой  $m$  обозначена доля приведенного сопротивления реохорда левее движка, т.е. значение  $m$  может изменяться в пределах  $0 \dots 1$ . Так как стрелка жестко связана с движком реохорда, то значение  $m$  характеризует показания потенциометра.

Выберем контур *усилитель — движок — точка a — участок m реохорда —  $R_{II}$  —  $R_m$  — точка b — термодпара — усилитель* и зададимся направлением обхода против часовой стрелки. При температуре  $t_{II}$  нижнего предела измерения  $m = 0$  (движок стоит в крайнем левом положении) уравнение Кирхгофа в момент равновесия будет иметь вид

$$E(t_{II}, t_0) = I_1 R_u - I_2 R_m \quad (7.16)$$

При температуре  $t_k$  верхнего предела измерения  $m = 1$  (движок в крайнем правом положении):

$$E(t_k, t_0) = I_1 R_{np} + I_1 R_{II} - I_2 R_m \quad (7.17)$$

Вычитая (7.16) из (7.17), получаем:

$$E(t_k, t_0) - E(t_{II}, t_0) = I_1 R_{np} \quad (7.18)$$

Таким образом, значение  $R_{np}$  зависит от диапазона измерения потенциометра.

При произвольной температуре  $t$  уравнение равновесия будет иметь вид

$$E(t, t_0) = m R_{np} I_1 + I_1 R_{II} - I_2 R_m \quad (7.19)$$

где  $m R_{np}$  — часть приведенного сопротивления реохорда левее движка.

Отсюда можно получить выражение для статической характеристики потенциометра:

$$m = \frac{E(t, t_0) - I_1 R_n + I_2 R_m}{R_{np} I_1} \quad (7.20)$$

Как рассчитать сопротивление  $R_m$ ? Приблизительно это можно сделать, используя выражение (7.19), которое можно записать в виде

$$E(t, t_0) + I_2 R_m = m R_{np} I_1 + I_1 R_n \quad (7.21)$$

При увеличении  $t_0$  ЭДС термопары уменьшится на  $E(t_0, 0)$ , а сопротивление  $R_m$  возрастет на значение  $\Delta R_m$ . По условию компенсации при изменении  $t_0$ , но постоянном значении  $t$ , показания потенциометра изменяться не должны, т.е. левая часть уравнения (7.21) должна оставаться постоянной при изменениях  $t_0$  и  $E(t, t_0)$ . Если градуировочное значение температуры свободных концов составляет  $0^\circ\text{C}$ , то должно выполняться условие:

$$\Delta R_m I_2 = E(t_0, 0).$$

Сопротивление медной проволоки в зависимости от температуры  $t_0$  определяется по формуле

$$R_m = R_{m0}(1 + \alpha t_0),$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент электросопротивления меди;  $R_{m0}$  — сопротивление резистора при  $0^\circ\text{C}$ , отсюда

$$\Delta R_m = R_{m0} \alpha t_0.$$

Окончательно имеем

$$E(t_0, 0) = R_{m0} \alpha t_0 I_2,$$

и, следовательно,

$$R_{m0} = \frac{E(t_0, 0)}{\alpha t_0 I_2} \quad (7.22)$$

Заметим, что  $(E(t_0, 0)/t_0)$  является коэффициентом преобразования (чувствительность) термопары в температурном отрезке  $(0 - t_0)$ . Чем больше чувствительность термопары, тем больше должна быть величина медного сопротивления. При нелинейной зависимости  $E(t_0, 0) = f(t_0)$  коэффициент преобразования изменяется с ростом температуры (у ТХА он растет), т.е.  $R_{m0}$  должно увеличиваться с ростом температуры свободных концов  $t_0$ . В то же время  $R_{m0}$  — это сопротивление медного резистора при  $0^\circ\text{C}$  (или значения при

исходной расчетной температуре, обычно  $20$  или  $30^\circ\text{C}$ ), т.е. для конкретного потенциометра оно имеет одно определенное значение.

Следовательно, для расчета  $R_{m0}$  нужно задаться каким-то определенным значением  $t_0$ , а при всех температурах свободных концов, отличных от этого значения, возникнет погрешность компенсации. Очевидно, что эта погрешность будет тем больше, чем больше отклонение действительной температуры  $t_0$  от принятой за расчетную. Для уменьшения погрешности компенсации за расчетную температуру свободных концов обычно принимают наиболее вероятное значение  $t_0$  (например, для КСП2 это  $30^\circ\text{C}$ ) и в схемах указывают сопротивление  $R_m$  при этой температуре (а не  $R_{m0}$ ). В реальных условиях при изменении  $R_m$  незначительно изменяются токи  $I_1$  и  $I_2$ , что усложняет соотношение, которое используется для расчета  $R_m$ .

**Прибор РП-160 для измерения термоЭДС.** Отличительной особенностью приборов этого типа является наличие входного усилителя (унифицирующего), выходной сигнал которого в пределах диапазона измерения меняется от  $0$  до  $1$  В постоянного напряжения. Схема РП-160 представлена на рис. 7.18. В этой схеме термоэлектрический преобразователь ТЭП подключен к входным зажимам  $1$  и  $2$  РП термоэлектродными удлиняющими проводами ТЭ<sub>1</sub> и ТЭ<sub>2</sub> (по составу они разные). Такое подключение сделано для того, чтобы свободные концы ТЭП были на входных зажимах  $1, 2$ , рядом с которыми находится встроенный в прибор элемент, реагирующий на изменение температуры свободных концов  $t_0$ . Этим элементом измерительной схемы является медный резистор  $R_m$ , предназначенный для компенсации изменения термоЭДС при изменении температуры свободных концов (его температура всегда должна быть равна

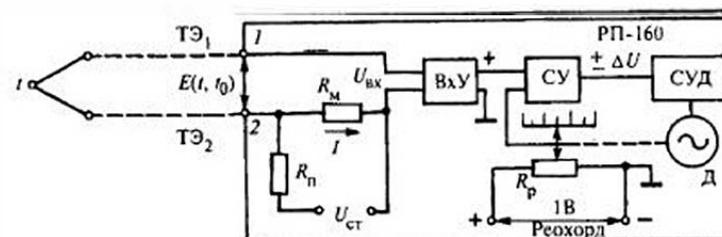


Рис. 7.18. Схема прибора РП-160 для измерения термоЭДС

температуре свободных концов  $t_0$ ). Сопротивление резистора  $R_m$  при  $0^\circ\text{C}$  равно 10 Ом. Через  $R_m$  пропускается стабилизированный ток от стабилизированного источника  $U_{ст}$ . Ток должен быть различным для разных НСХ ТЭП, что обеспечивается изменением резистора  $R_n$ .

Смысл введения поправки прост. При повышении температуры свободных концов  $t_0$  уменьшается термоЭДС термопары на  $E(t_0, 0)$ , но при этом увеличивается сопротивление  $R_m$  на  $\Delta R_m$  и, следовательно, падение напряжения на нем па  $(\Delta R_m I)$ . Напряжение на входе усилителя и показание прибора не изменятся. Однако даже при  $t_0 = 0$  (когда поправку вводить не нужно) на  $R_m$  будет падение напряжения, которое суммируясь с термоЭДС термопары увеличит напряжение на входе усилителя и показания прибора. Чтобы избежать этого, в схеме входного усилителя есть схема коррекции нижнего предела измерения.

Основным элементом схемы является реохорд  $R_p$  — линейный проволочный резистор определенного сопротивления, длина которого (за исключением нерабочих участков) равна длине шкалы. На него подается стабилизированное напряжение 1 В. На суммирующий усилитель СУ подается разность выходного напряжения входного усилителя и напряжения с участка реохорда правее движка. Усиленный сигнал разбаланса поступает на пусковую схему СУД шагового двигателя, которая определяет направление вращения двигателя и его скорость — она должна быть большей при большом разбалансе и уменьшаться при приближении к состоянию равновесия. Шаговый двигатель перемещает движок реохорда до такого положения, при котором напряжение с входного усилителя и реохорда сравниваются. С движком реохорда жестко скреплена стрелка, которая укажет значение измеряемой температуры. Предел допускаемой погрешности потенциометра по показаниям составляет  $\pm 0,5\%$ , по регистрации  $\pm 1\%$ .

### 7.2.3. Преобразователи с унифицированным токовым выходным сигналом для ТЭП

Нормирующие преобразователи как для ТЭП, так и для ТС являются устройствами с отрицательными обратными связями, принципы действия которых были рассмотрены в п. 7.1.4. Преобразователи для ТЭП, обеспечивают получение унифицированного токового сигнала, пропорционального измеряемой температуре. От преобразователей для ТС они отличаются только входными измерительными схемами.

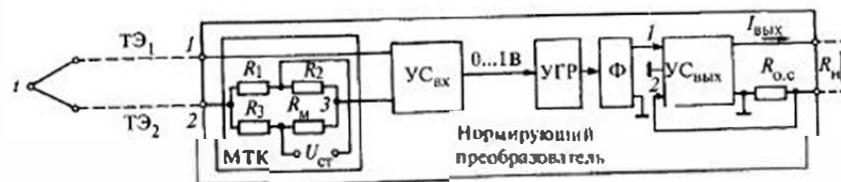


Рис. 7.19. Структурная схема нормирующего преобразователя для ТЭП

Структурная схема нормирующего преобразователя (НП) для ТЭП приведена на рис. 7.19. Преобразователь ТЭП подключается к зажимам термоэлектродными удлиняющими проводами ТЭ<sub>1</sub> и ТЭ<sub>2</sub> (по составу они разные). Это сделано для того, чтобы вывести свободные концы ТЭП к входным зажимам НП 1, 2, рядом с которыми внутри НП находится термочувствительный элемент, входящий в схему компенсации изменения термоЭДС при изменении температуры свободных концов  $t_0$  ТЭП. В простейшем случае схемой компенсации является мостовая схема МТК. Одно из плеч моста составляет медный резистор  $R_m$  при трех других неизменных резисторах  $R_1, R_2, R_3$ . Принцип введения поправки с помощью такого моста подробно рассмотрен в § 6.3. При изменениях  $t_0$  меняется термоЭДС. Эти изменения компенсируются сигналом небаланса моста  $U_{2,3}$ , который вызван изменением  $R_m$  в соответствии с изменением  $t_0$ . Скорректированная на  $t_0$  термоЭДС ТЭП поступает на входной усилитель  $УС_{вх}$ , который и последующие элементы аналогичны элементам преобразователей для ТС. Выходное напряжение усилителя  $УС_{вх}$  изменяется в пределах (0...1) В, независимо от пределов измерения (напряжение равно нулю на нижнем пределе измерения и 1 В — на верхнем).

Следующей ступенью является устройство гальванического разделения входных и выходных цепей НП (это повышает помехозащищенность измерительной линии, в которую включен НП);  $\Phi$  — фильтр, обеспечивающий подавление помехи переменного напряжения. К выходу последнего подключен выходной усилитель с унифицированным выходным сигналом по току или напряжению (на рис. 7.19 изображена схема для токового выходного сигнала).  $УС_{ввых}$  представляет собой дифференциальный усилитель с большим коэффициентом усиления, на вход 1 которого поступает напряжение  $U_1$  с фильтра  $\Phi$  (пропорциональный измеряемой термоЭДС), а на вход 2 — напряже-

ние с резистора обратной связи  $R_{о.с}$  равно ( $I_{вых}R_{о.с}$ ). Усилитель реагирует на разностный сигнал

$$\Delta U = U_1 - I_{вых}R_{о.с}$$

и устанавливает такой ток, при котором  $\Delta U \approx 0$ .

Технические характеристики некоторых типов нормирующих преобразователей для ТЭП приведены в табл. 7.3. Характеристики ТЭП со встроенными в головку нормирующими преобразователями даны в табл. 6.2. Рассмотренные в п. 7.1.4 интеллектуальные универсальные преобразователи SITRANS T могут работать и с термомпарами градуировки ПП, ХК и др. Компенсация изменения температуры свободных концов может быть внутренняя с использованием ТС гр. Pt100 и внешняя. При диапазоне измерения от  $-200$  до  $1800$  °С погрешность преобразователей при точной коррекции не превышает  $\pm(0,15...2,5)$  °С.

Существуют нормирующие преобразователи для входных сигналов взаимной индуктивности  $0...10$  мГн или  $10...0...10$  мГн.

Таблица 7.3

Характеристики нормирующих преобразователей

Тип	НСХ	Предельная основная погрешность, %	Время установления выходного сигнала
Ш-9321	50П, 100П 50М, 100М	0,1 или 0,25	5 с
Ш-9322	L, K A — 1, 2, 3 S, B		
ИПМ-0196	50П, 100П 50М, 100М	0,25	10 с
НП-5-Б1	L, K	1,0	80 мкс
НП-5-Б2	ТСМ ТСП	0,5	
НП-ПЗ	0...10 мГн 10...0...10 мГн	1,0 или 1,5	—
Ш-703М1	ТСП	0,4 или 0,5	—
Ш-704М1	ТСМ		
Ш-705М1	L, K A — 1, 2, 3 S, B		
НП-02	ТСП, ТСМ ХК, ХЛ ПП, ПР	0,1; 0,5	1 с

### 7.3. Вторичные пневматические приборы

Вторичные пневматические приборы предназначены для измерения унифицированных пневматических выходных сигналов (20—100) кПа первичных преобразователей. Вторичные приборы могут иметь унифицированную процентную шкалу, либо именованные шкалы в соответствии со стандартными рядами пределов для манометров, термометров, дифманометров, вакуумметров, мановакуумметров (дополнительно возможна шкала в единицах расхода или уровня). Приборы могут быть только показывающими, одно-, двух- или трехканальными с записью на одной диаграммной ленте. Принцип действия измерительного механизма приборов основан на методе силовой компенсации, при котором момент, развиваемый чувствительным элементом, уравновешивается моментом пружины обратной связи. Степень натяжения пружины обратной связи определяет положение стрелки на шкале вторичного прибора.

Принципиальная схема вторичных самопишущих малогабаритных компенсационных приборов изображена на рис. 7.20.

Действие прибора основано на компенсационном принципе измерения, при котором усилие на чувствительном элементе — сильфоне 1, создаваемое измеряемым давлением  $P_{изм}$ , уравновешивается усилием, создаваемым устройством обратной связи 2. Сжатый воздух от источника питания  $P_{пит}$ , поступает через дроссель 3 в линию, соединяющую сопло 4 с устройством обратной связи. Изменение  $P_{изм}$  нарушает равенство усилий, что приводит к изменению зазора между заслонкой 5, закрепленной на конце рычага 6 и соплом 4. Это вызывает изменение давления воздуха в линии сопла, а следовательно, и в устройстве обратной связи. При этом перемещается сферическая мембрана 7 устройства обратной связи и упирающийся в нее рычаг 8, который соединен с рычагом 6

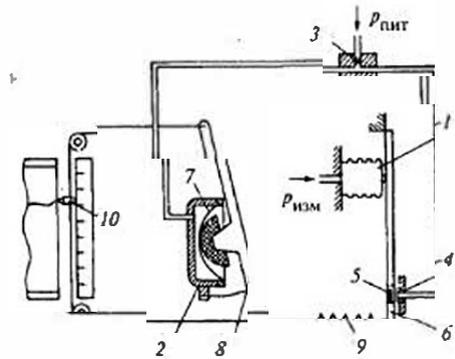


Рис. 7.20. Принципиальная схема вторичного пневматического прибора:

1 — сильфон; 2 — устройство обратной связи; 3 — дроссель; 4 — сопло; 5 — заслонка; 6, 8 — рычаг; 7 — мембрана; 9 — пружина обратной связи; 10 — указатель прибора

Таблица 7.4

## Технические характеристики пневматических вторичных приборов

Тип	Тип шкалы	Число каналов измерения	Класс	Запись
ПКП 1-2	Дуговая	1	0,5	Нет
ПКП 1	Вертикальная 100 мм	1	0,5; 1	Нет
ПКП 2	Две вертикальных по 100 мм	2	0,5; 1	Нет
ПКП 1Э ПКП 1П	Вертикальная 100 мм	1	0,5; 1	Нет
ПКР 1	Вертикальная 100 мм	1	0,5; 1	Есть
ПКР 2	Две вертикальных по 100 мм	2	0,5; 1	Есть
ПВ4 4Э	Три вертикальных по 100 мм	3	1	Есть

при помощи пружины обратной связи 9. Изменение натяжения пружины будет происходить до тех пор, пока усилие, развиваемое сильфоном 1, не уравновесится усилием обратной связи. Перемещение рычага 8 через тягу передается перу и указателю прибора 10. Привод диаграммы осуществляется электродвигателем. Класс приборов 1.

Технические характеристики вторичных пневматических приборов приведены в табл. 7.4. Выпускаются электропневматические преобразователи, которые токовый сигнал преобразуют в пневматический, подаваемый в пневматические регуляторы (пневмоконтроллеры) и сервомеханизмы. Так фирма VALCOM производит преобразователи РС-13, преобразующие сигналы 4...20 и 0...20 мА в пневматические сигналы 0,2...2 бар и 0,14...0,4 бар с погрешностью  $\pm 0,25\%$ .

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит преимущество потенциметрического метода измерения сопротивления ТС (четырёхпроводное подключение)?
2. Дайте сравнительную характеристику уравновешенных и неуравновешенных мостов для измерения сопротивления.
3. Чем определяется преимущество трехпроводного подключения ТС к мосту по сравнению с двухпроводным?
4. Охарактеризуйте принцип действия автоматического уравновешенного моста.
5. Как обеспечивается стабильность коэффициента преобразования в нормирующих преобразователях для ТС и ТЭП?

6. Перечислите условия, которые должны выполняться при измерении температуры пирометрическим милливольтметром и автоматическим потенциометром?
7. Как производится компенсация изменения температуры свободных концов в автоматических потенциометрах типа КСП?
8. Какие функции выполняют микропроцессоры в интеллектуальных преобразователях для ТС и ТЭП?
9. Каковы особенности пневматической системы дистанционной передачи информации и каков принцип действия вторичных пневматических приборов?

## Глава восьмая

### Цифровые вторичные измерительные приборы и преобразователи

#### 8.1. Общие сведения

Последние десятилетия характеризуются широким внедрением цифровых микропроцессорных вторичных приборов и преобразователей в практику теплотехнических измерений. В значительной мере это определяется распространением в энергетике, химической, металлургической и других отраслях промышленности микропроцессорных систем управления таких, как ПТК «Квинт», «Телеперм», «Теплоник», «Саргон» и др. Появились распределенные информационные системы сбора информации о потреблении энергии, воды, газа и других энергоносителей. К таким системам предъявляются повышенные требования по помехозащищенности, надежности, защите от несанкционированного доступа. Измерительные каналы от первичных средств измерения до удаленных показывающих и регистрирующих приборов включают много дополнительных устройств передачи и преобразования информации, которые оказывают то или иное влияние на ее качество. К числу таких устройств, входящих во вторичные цифровые измерительные устройства и системы, относят аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, мультиплексоры, блоки цифровой индикации, дисплеи, модемы, адаптеры, проводные и беспроводные линии связи и другие элементы. Рассмотрение большинства перечисленных элементов выходит за рамки данного учебника [19, 20], но часть из них, входящая в представленные в учебнике приборы для измерения теплотехнических величин, будет рассмотрена в § 8.3.

Цифровые измерительные приборы по сравнению с аналоговыми обладают следующими преимуществами: автоматическим процессом измерения, малыми габаритами, удобством включения в цифровые информационные и управляющие системы, использованием универсальной элементной базы, индикацией сигналов в цифровой форме и пр. Элементы цифровых измерительных приборов работают в импульсном режиме, характеризуемым наличием двух состояний, резко отличающихся уровнем напряжений, что обеспечи-

вает их различимость и высокую помехоустойчивость приборов. Последнее имеет место при использовании кабелей с заданными характеристиками, гарантирующими сохранение четкой различимости уровней квантования, что исключает возможность потери информации.

Преобразование аналоговой информации в цифровой код  $X_d(t)$  сопровождается временной дискретизацией непрерывной величины  $X(t)$  и ее квантованием по уровню. Эти операции иллюстрирует график, представленный на рис. 8.1. При временной дискретизации непрерывная величина заменяется совокупностью мгновенных значений, остающихся постоянными в течение шага дискретизации  $\tau$ . Процесс квантования заключается в замене непрерывной измеряемой величины ступенчатой с фиксированными уровнями.

Оба преобразования связаны с появлением погрешностей квантования и дискретизации. Первая погрешность связана с измерением нестационарных величин. Она не превысит половины шага квантования  $\mu$  при замене в момент измерения величины  $X(t)$  ближайшим дискретным значением. Однако, как видно из графика на рис. 8.1, в пределах шага дискретизации эта погрешность может значительно превышать  $\mu/2$ , если частота дискретизации сигнала не согласована с частотами изменения измеряемого сигнала. В соответствии с теоремой Котельникова аналоговый сигнал в области рабочих частот  $0 - f_{гр}$  может быть восстановлен, если частота дискретизации вдвое превышает  $f_{гр}$ . Погрешность квантования определяется шагом квантования  $\mu$ , зависящим от разрядности аналого-цифрового преобразователя. При замене в момент измерения непрерывной величины одним из ближайших соседних дискретных значений измеряемая величина может иметь любое значение в пределах половины шага квантования  $\mu$ . В связи с этим погрешность преобразования считают случайной, распределенной равномерно в интервале  $\pm \mu/2$  с  $\sigma = \mu/(2\sqrt{3})$ .

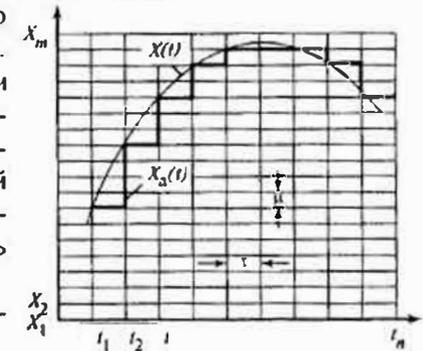


Рис. 8.1. Дискретизация по времени и квантование по уровню непрерывной измеряемой величины

## 8.2. Структура цифровых измерительных приборов и преобразователей

Подобно аналоговым вторичные цифровые приборы могут быть показывающими, показывающими и регистрирующими. В обоих случаях они могут выполнять дополнительные функции по сигнализации отклонений измеряемой величины, ее регулированию, преобразованию в токовый или цифровой выходные сигналы. К числу показывающих цифровых приборов относятся устройства многоканальной сигнализации УМС, которые осуществляют циклический контроль температуры в 16 точках. Приборы работают с платиновыми и медными термопреобразователями сопротивления. На дисплее прибора высвечиваются номер контролируемой точки и значение измеряемой температуры в цифровой форме, результаты сравнения измеряемых температур с уставками трехпозиционной сигнализации: «Мало», «Норма», «Много». УМС также преобразуют значение измеряемой температуры в унифицированный токовый сигнал 0...5 мА, производя линеаризацию градуировочной характеристики термопреобразователей. Диапазоны измерения составляют 0...200 °С и 0...800 °С, последний диапазон используется при работе с термопреобразователями градуировок 50П и 100П. Основная приведенная погрешность по показаниям и преобразованию составляет  $\pm 0,5\%$ , по сигнализации  $\pm 0,6\%$ . Время цикла автоматического опроса не превышает 60 с, возможен опрос в неавтоматическом режиме.

Структурная схема УМС представлена на рис. 8.2. Термопреобразователи сопротивления ТС подключены к прибору по трехпроводной схеме и питаются стабилизированным током. Коммутатор поочередно подключает термопреобразователи к измерительному усилителю ИУ и аналого-цифровому преобразователю АЦП. На дисплее прибора высвечивается цифровое значение температуры ЦИ и технологическая информация ТИ о срабатывании устройства сигнализации УСг. Цифроаналоговый преобразователь ЦАП создает на выходе прибора унифицированные токовые сигналы 0...5 мА, пропорциональные значениям каждой из измеряемых температур.

Структура микропроцессорных цифровых регистрирующих приборов существенно сложнее структуры, рассмотренного прибора. Это связано с их более широкими функциональными возможностями. Так, «Метран-900», структурная схема которого представлена на рис. 8.3, состоит из двух блоков: коммутации и цифровой регистра-

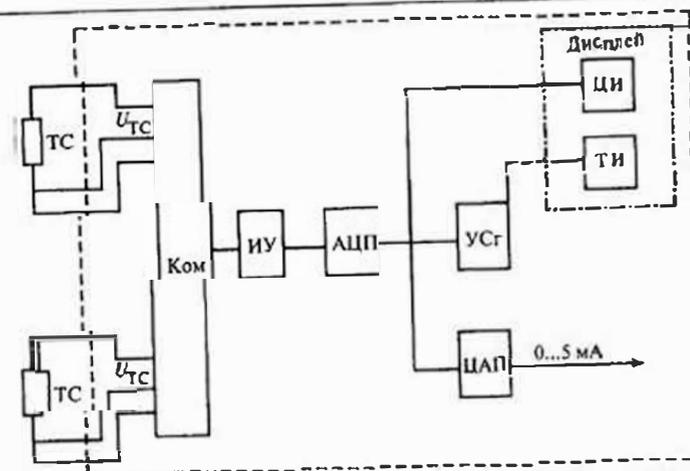


Рис. 8.2. Структурная схема устройства многоканальной сигнализации температуры

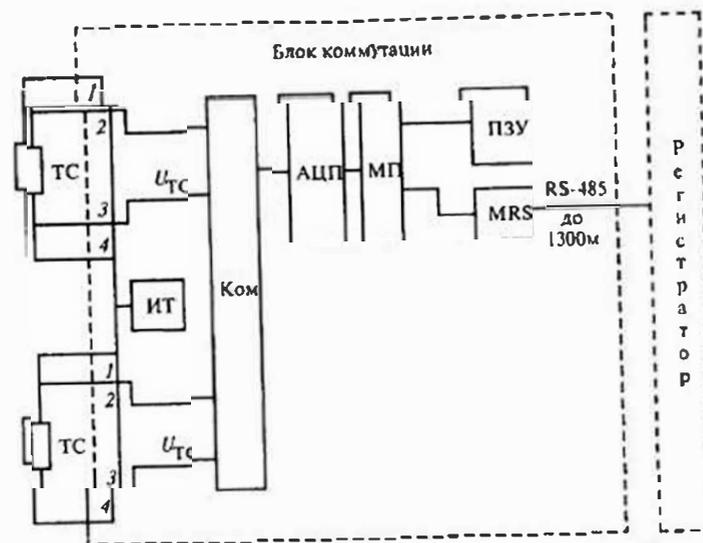


Рис. 8.3. Структурная схема цифрового прибора «Метран-900»

ции. К блоку коммутации может подключаться до 12 первичных преобразователей: термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических, с унифицированным выходным сигналом и сигналом взаимной индуктивности. На рис. 8.3 показаны варианты подключения термопреобразователей сопротивления по четырехпроводной и

трехпроводной схемам. Термопары подключаются к коммутатору термоэлектродными проводами к клеммам, соответствующим градуировке термопар. Введение поправки на изменение температуры свободных концов производится с помощью специализированной микросхемы, которая обеспечивает введение температурной компенсации в диапазоне изменения температуры свободных концов от  $-55$  до  $125$  °C с погрешностью от  $\pm 0,3$  до  $\pm 2$  °C в зависимости от типа термопары и температуры свободных концов. Скорректированный сигнал термопар усиливается.

Для коммутации входных сигналов используется мультиплексор (Ком), который осуществляет поочередное подключение сигналов первичных преобразователей к шестнадцатиразрядному аналого-цифровому преобразователю. Цифровой сигнал с выхода АЦП поступает на сигнальный процессор с тактовой частотой 16 МГц, создаваемой внутренним импульсным генератором. К процессору подключено внешнее постоянное запоминающее устройство ПЗУ и микросхема MRS, обеспечивающая передачу информации по интерфейсу RS-485 на регистратор. Блок коммутации по каждому каналу имеет цифровой фильтр, в блоке производятся такие операции как линейризация сигналов, их масштабирование, извлечение квадратного корня и др. Настройка каналов коммутатора производится с помощью переносного пульта управления, подключаемого к специальному разъему. Блок коммутации может использоваться как самостоятельное устройство для преобразования аналоговых сигналов первичных преобразователей в цифровой код. Регистратор может находиться на расстоянии до 1500 м от блока коммутации, размещаемого вблизи первичных преобразователей. Такая техническая реализация «Метран-900» обеспечивает существенное снижение расхода проводов, поскольку от коммутатора к регистратору идет только одна витая пара.

Регистратор «Метран-900» высвечивает информацию на жидкокристаллическом дисплее (рис. 8.4, а), производит ее запись и хранение в энергонезависимой памяти в течение 33 суток, выводит данные за требуемый интервал времени на дисплей (рис. 8.4, б), имеет для печати вывод в интерфейсе RS-232 или RS-485, выдает сигнал аварийной сигнализации. Периодичность регистрации может назначаться оператором в пределах от 5 до 48 с. Предел приведенной погрешности «Метран-900» при измерении токового сигнала составляет  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,2$  %, сигнала взаимной индуктивности  $\pm 1$  %, сопротивления термопреобразователя  $\pm 0,1$  %, сигнала термопары в зависимости от диапазона измерения от  $\pm 1$  °C ( $-270 \dots 400$  °C) до  $\pm 5$  °C ( $0 \dots 2500$  °C).

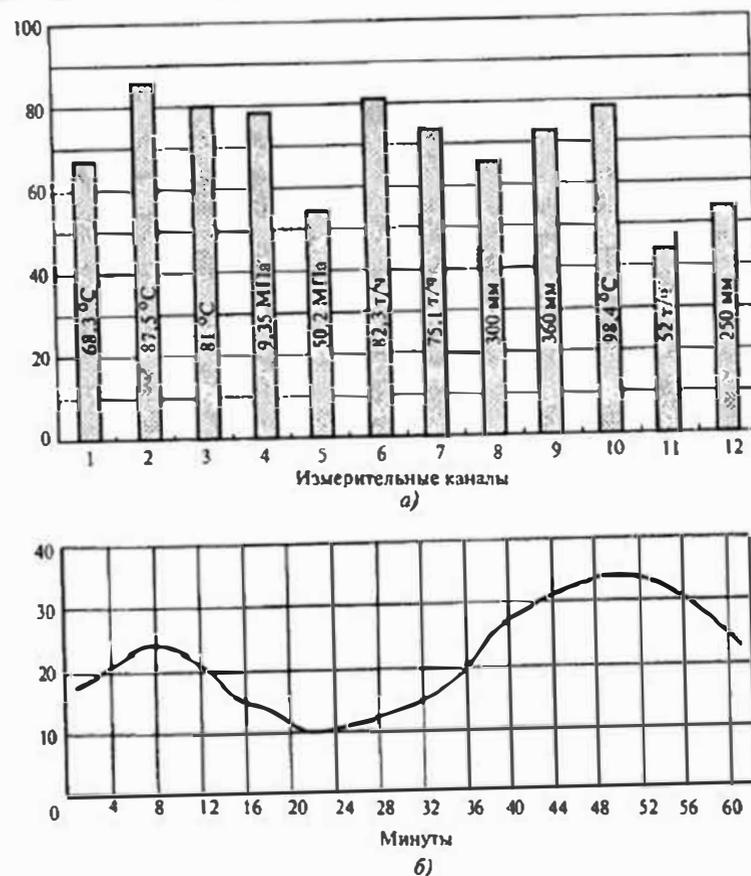


Рис. 8.4. Изображения на экране регистратора «Метран-900» в режиме индикации текущих значений (а) и в режиме хронологии изменений величины в течение часа (б)

В упомянутых ранее «Технографах 160» результаты измерений представляются и регистрируются на диаграмме в аналоговом или цифровом виде. Эти приборы, так же как и «Метран-900», могут работать с термопреобразователями сопротивления и термоэлектрическими преобразователями с унифицированными сигналами по постоянному току и напряжению. «Технограф 160» имеет 12 измерительных каналов. Эти приборы обеспечивают:

- индикацию измеряемой величины на цифровом табло;
- аналоговую и цифровую регистрацию измеряемого параметра на диаграммной ленте в циклическом режиме;

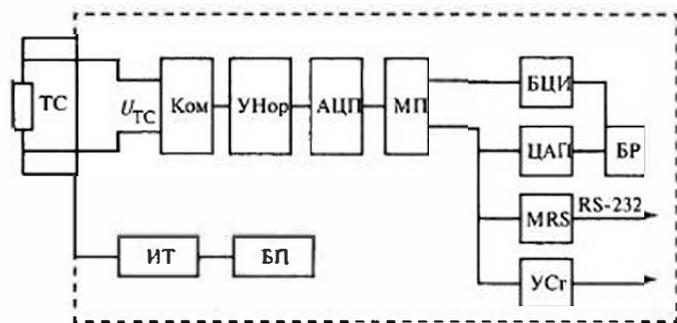


Рис. 8.5. Структурная схема регистратора «Технограф 160»

- преобразование входного сигнала в цифровой код для обмена по интерфейсу RS-232;
- сигнализацию о выходе измеряемой величины за пределы заданных значений;
- извлечение корня квадратного и суммирование при измерении расхода по перепаду давления на сужающем устройстве.

Термопреобразователь сопротивления, через который протекает стабилизированный ток до 5 мА, подключен к вторичному прибору по четырехпроводной схеме (рис. 8.5). Подключение термопар производится термоэлектродными удлиняющими проводами. Коммутатор на герконовых реле Ком с частотой 1 Гц подает сигналы на нормирующий усилитель УНор, который обеспечивает на выходе сигнал 1 В на диапазон измерения. После аналого-цифрового преобразователя АЦП двойного интегрирования цифровой сигнал поступает на микропроцессор МП. Его интерфейс включает блок цифровой индикации БЦИ, цифроаналоговый преобразователь ЦАП с блоком аналоговой и цифровой регистрации БР, модем RS-232 и устройство сигнализации отклонений УСг типа «сухой контакт». Управление работой всех элементов и ее синхронизацию выполняет блок импульсного управления, не показанный на схеме. Предел основной приведенной погрешности по показаниям и цифровой регистрации составляет  $\pm 0,25\%$ , по аналоговой регистрации и сигнализации  $\pm 0,5\%$ . Цикл измерения по всем каналам не превышает 12 с, цикл регистрации устанавливается с помощью клавиатуры от 10 до 600 с. Пределы измерения приборов по температуре соответствуют стандартному ряду, приведенному в табл. 7.1, по давлению в табл. 10.2 и по расходу в § 12.1.

В микропроцессорных системах управления технологическими процессами и промышленными объектами большое место занимают распределенные системы сбора данных, в которых территориально

распределенные устройства преобразуют аналоговую информацию о параметрах технологических процессов: температуре, давлении, расходе, уровне, составе газов и растворов в цифровой код. К числу таких преобразователей относится рассмотренный коммутатор «Метран-300».

Широкие возможности для сбора и обработки информации представляют устройства серии ADAM-5000 фирмы ADVANTECH. Эти устройства входят в распределенную систему преобразователей на базе интерфейсов Ethernet или RS-485 и осуществляют ввод и вывод аналоговых и дискретных сигналов, их первичное преобразование. По команде от удаленной вычислительной машины информация передается в ее адрес с использованием упомянутых интерфейсов. Скорость передачи информации достигает 115 кбод. В корпусе одного устройства находятся процессор, кросс-плата и модули ввода-вывода, число которых может составлять 4 или 8. В последнем случае общее число каналов ввода-вывода может достигать 128, максимальная длина линии без повторителя равна 100 м. В состав модулей ввода-вывода входят модули для подключения ТС с диапазоном измерения от  $-100$  до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; ТЭП с диапазоном измерения от  $-100$  до  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  и аналоговых сигналов. Погрешность преобразования не превышает  $0,1\%$ , частота выборки составляет 10 Гц. Для построения распределенных систем сбора данных той же фирмой выпускаются компактные модули ADAM-4000. Эти модули имеют встроенный микропроцессор и 16-разрядный АЦП, прием и передача цифровых сигналов осуществляется по интерфейсу RS-485. Модули серии ADAM 6000 имеют встроенную web-страницу, что позволяет их интегрировать в сеть Internet.

### 8.3. Основные элементы цифровых измерительных приборов

Не только цифровые, но и многие вторичные аналоговые приборы и преобразователи, особенно микропроцессорные, имеют на выходе помимо токового выходного сигнала и цифровой, что обуславливает появление в их структуре элементов, присущих цифровым измерительным приборам. Эти элементы реализуются в виде серий микросхем, характеризуемых общими как технологическими и схемотехническими решениями, так и уровнями электрических сигналов и напряжений питания. Основными характеристиками таких элементов являются:

- быстродействие, определяемое временем задержки распространения сигнала и максимальной рабочей частотой;

- коэффициенты объединения по входу и выходу, характеризующие максимальное число однотипных логических элементов, которые подключаются ко входу или выходу устройства;
- входные пороговые напряжения высокого и низкого уровня;
- выходное напряжение высокого и низкого уровней;
- напряжение питания.

В настоящее время существуют разнообразные по структуре информационные и управляющие системы. Рассматриваемые элементы используются не только во вторичных приборах, но и могут входить в состав многофункциональных плат ввода-вывода, относящихся к устройствам связи с технологическими объектами (УСО), выполняться в виде автономных устройств ввода аналоговых и дискретных сигналов, входить в состав специализированных контроллеров.

Важный момент работы цифровых приборов и систем с источниками первичной информации — гальваническое разделение измерительных каналов, исключающее возникновение погрешностей из-за образования паразитных контуров.

**Коммутатор** представляет собой устройство с одним выходом и несколькими информационными и управляющими входами. Коммутаторы (переклюатели, мультиплексоры) применяются в аналоговых и цифровых многоточечных измерительных приборах, в УСО при последовательном вводе и выводе информации в ЭВМ. Коммутаторы бывают электромеханическими и электронными. Важными характеристиками этих устройств является скорость коммутации и величина сопротивления при замыкании и разрыве цепи. Недостаток электромеханических переключателей — низкая скорость коммутации, а достоинство — бесконечно большое сопротивление, имеющее место при разрыве цепи.

Электронные коммутаторы (мультиплексоры) имеют высокую скорость коммутации, но конечное сопротивление в состоянии разрыва. Мультиплексоры могут работать в режиме мультиплексирования данных, когда их выход последовательно повторяет состояние их информативных входов. Этот режим задается цифровым кодом на управляющих входах. Мультиплексоры могут иметь несколько дифференциальных входов, имеющих инструментальные усилители с устанавливаемыми коэффициентами усиления, например 0,5; 1; 2; 10; 50; 200 и 1000, что позволяет на вход одного АЦП коммутировать сигналы от термопар, термопреобразователей сопротивления и преобразователей с токовым выходным сигналом. Может предусматриваться схема компенсации температуры холодного спая. Частота коммутации аналоговых сигналов составляет 1...100 Гц, импульсных — достигает десятков кГц.

**Дешифратор** (декодер), включающий интегральные логические элементы, представляет собой цифровое электронное устройство, которое различным кодовым комбинациям на его  $m$  входах ставит в соответствие  $n$ -элементный двоичный код на его выходе. Если число выходов составляет  $2^m$ , то дешифратор является полным, если меньше, то неполным. Дешифраторы используются в блоках цифровой индикации, цепях логического управления исполнительными устройствами, автоматических защитах. В качестве примера на рис. 8.6, а приведена схема дешифратора, входящего в блок цифровой индикации. Эти блоки присутствуют во всех цифровых приборах. Для представления цифр от 0 до 9 используется четырехразрядный двоичный код, который подается на информационные входы  $x_0, x_1, x_2, x_3$ . В табл. 8.1 приведены двоичные коды сигналов, соответствующие упомянутым цифрам.

Обычно стилизованные изображения всех десятичных цифр в светодиодных индикаторах содержат семь светящихся сегментов, представленных на рис. 8.6, б. Для управления светодиодами дешифратор должен иметь семь выходов, обеспечивающих включение соответствующих сегментов светодиодов. Дешифратор работает, если на входе  $U$  присутствует сигнал высокого уровня, при сигнале низкого уровня все выходы дешифратора обнуляются, независимо от сигналов на его информационных входах.

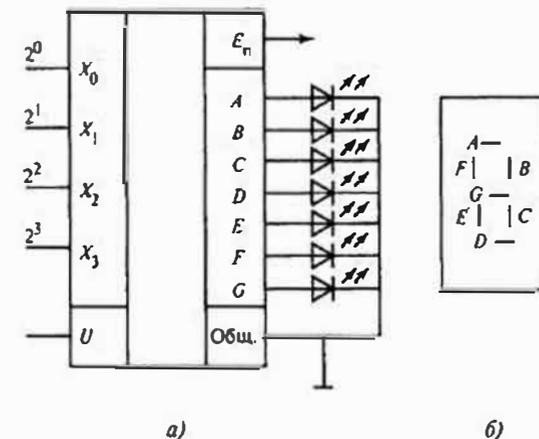


Рис. 8.6. Схема блока цифровой индикации:  
а — дешифратор; б — сегментный цифровой индикатор

Таблица 8.1

Входные и выходные коды сигналов											
Цифра	Входы				Выходы (сегменты)						
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	A	B	C	D	E	F	G
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
3	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1
4	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
5	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1

Таким образом, дешифраторы преобразуют двоичные сигналы на его информативных входах в активные уровни выходных сигналов. Столбцы состояний выходов от *A* до *G* в табл. 8.1 при реализации цифр от 0 до 9 определяются так называемыми булевыми уравнениями, включающими логические преобразования кодов на входах  $x_0 - x_3$ . Так, сегмент *A* должен светиться при подаче на вход двоичных кодов, соответствующих цифрам 0, 2, 3, 5, 7, 8, 9. Если  $x_i$  обозначает операцию повторения сигнала на *i*-м входе, а  $\bar{x}_i$  — инвертирования, то очевидно, что в соответствии с табл. 8.1, сектор *A* будет светиться при следующем преобразовании сигналов на входе дешифратора, когда любое из семи слагаемых будет единицей

$$Y_A = \bar{x}_0 \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_0 x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + x_0 x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 + x_0 \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + x_0 x_1 x_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_0 \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 + x_0 \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3.$$

**Цифроаналоговые преобразователи** предназначены для преобразования двоичного кода в аналоговый сигнал по напряжению или току. Эти преобразователи стоят во всех вторичных цифровых приборах, имеющих токовый выходной сигнал. Зависимость, связывающая напряжение на выходе преобразователя  $U_{\text{вых}}$ , диапазон его изменения  $U_d$  и разрядность  $n$  с входным кодом, называется характеристикой преобразования  $U_{\text{вых}}/U_d = \delta U \sum_{k=0}^{n-1} 2^k a_k$ , где  $\delta U = 1/(2^n - 1)$ ,  $a_k$  равно 1 или 0, когда  $S_i$  соответственно замкнуто или разомкнуто.

Для четырехразрядного ЦАП  $U_{\text{вых}} = U_d(a_0 + 2a_1 + 4a_2 + 8a_3)/15$  и меняется ступенчато от 0 до  $U_d$  при  $a_0 = a_1 = a_2 = a_3 = 1$ . На рис. 8.7 представлена схема ЦАП, реализующего рассмотренную характеристику преобразования. ЦАП выполнен на основе транзисторных ключей  $S_0, S_1, S_2, S_3$  и аналогового сумматора на операционном усилителе с бес-

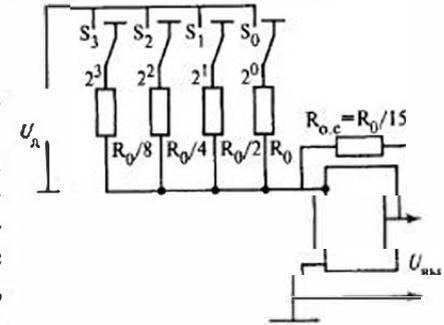


Рис. 8.7. Схема четырехразрядного ЦАП

конечно большим коэффициентом усиления. К основным характеристикам ЦАП относятся разрешающая способность  $\delta U$ , время установления  $t_{\text{уст}}$ , погрешность нелинейности и др. За  $t_{\text{уст}}$  выходной сигнал с момента поступления на вход ЦАП двоичного сигнала войдет в зону заданного значения с учетом допускаемой погрешности. Погрешность нелинейности определяется максимальным отклонением выходного сигнала от прямой в пределах всего диапазона преобразования.

**Счетчики** относятся к так называемым последовательностным цифровым устройствам, тогда как рассмотренные устройства — к комбинационным. Отличие состоит в том, что в комбинационных устройствах при пассивных уровнях входных сигналов выходные возвращаются в исходное состояние, тогда как последовательностные устройства хранят предыдущее состояние. В связи с этим в их состав помимо логических элементов входят элементы памяти. Счетчики обеспечивают хранение двоичного кода числа и выполняют микрооперации счета, которые заключаются в изменении значения числа на  $\pm 1$ . В суммирующих счетчиках число возрастает на 1, а в вычитающих уменьшается на 1. Если в счетчике выполняются обе операции, то он является реверсивным. В синхронных счетчиках изменение состояния его выходов происходит при поступлении на его вход импульса синхронизации. У асинхронных счетчиков изменения состояния могут происходить с некоторой задержкой по отношению к сигналу на информационном входе.

Основным параметром счетчика является модуль счета  $K_c$ , который определяет максимальное число сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком. Двоичный счетчик ( $K_c = 2$ ) с  $n$  разрядами может посчитать  $2^n$  сигналов, отобразив их в диапазоне чисел от 0 до  $(2^n - 1)$ . После сигнала с номером  $2^n$  происходит сброс счетчика.

В приборах с цифровой индикацией используется двоично-десятичный счетчик с  $K_c = 10$ . Выходные состояния этого счетчика представляются в виде двоично-десятичных кодов цифр от 0 до 9. К такому счетчику подключается дешифратор, управляющий светодиодным сегментным цифровым индикатором, показывающим число подсчитанных импульсов. Во вторичных приборах счетчики используются для суммирования импульсов при определении количества газа, пара, воды. В этом случае показания счетчика импульсов умножаются на цену импульса в тоннах, литрах,  $m^3$  и т.п. Показания дисплеев цифровых приборов обычно даются в единицах измеряемых величин.

*Аналого-цифровые преобразователи* предназначены для представления уровня аналогового сигнала на входе в виде двоичного сигнала на выходе. Все АЦП разделяются на два типа: последовательного и параллельного преобразования. К АЦП последовательного преобразования, характеризуемого невысоким быстродействием, относятся АЦП с последовательным счетом, с поразрядным уравниванием и интегрирующие. Структурная схема АЦП последовательного счета представлена на рис. 8.8.

Преобразуемый аналоговый сигнал  $U_{вх}$  в течение продолжительности интервала считывания, несколько меньшего времени дискретизации, поступает на вход операционного усилителя  $У$ , выполняющего функцию компаратора. На инвертирующий вход последнего поступает выходной сигнал цифроаналогового преобразователя, на цифровые входы которого подается двоичный сигнал счетчика СИ. На вход последнего поступают управляющие импульсы «Сброс» и «Пуск», а также тактовые импульсы с частотой  $f_T$ . По команде «Пуск» запускается счетчик числа импульсов СИ, его двоичный выходной сигнал, поступающий на вход ЦАП, вызывает ступенчатое нарастание сигнала на выходе последнего. Как только этот сигнал

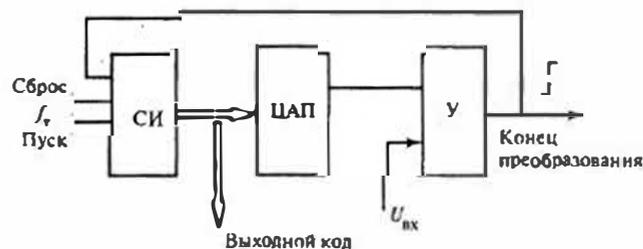


Рис. 8.8 Структурная схема АЦП последовательного счета

сравнивается с  $U_{вх}$  срабатывает компаратор, завершая преобразование. Выходной код счетчика является выходным двоичным сигналом преобразователя.

К АЦП последовательного преобразования относятся АЦП с двойным интегрированием. В них входной сигнал интегрируется в течение фиксированного времени, полученное значение  $U_c$  будет тем больше, чем больше величина входного напряжения. После завершения интервала интегрирования входного сигнала на вход интегратора подается опорный сигнал встречной полярности и одновременно с ним включается счетчик импульсов от внутреннего генератора импульсов. Счет прекращается, когда  $U_c$  снизится до нуля. Очевидно, что чем больше  $U_c$ , тем больше интервал времени интегрирования опорного напряжения и тем больше будут показания счетчика. АЦП двойного интегрирования характеризуются высокой помехозащищенностью, но имеют низкое быстродействие.

Микропроцессорные платы АЦП имеют функцию автоматического сканирования входных каналов, при этом последовательность и частота опроса, программируемый коэффициент усиления для каждого канала заносятся в специальную память платы, уменьшая нагрузку процессора.

К основным характеристикам АЦП относятся число разрядов (разрядность), быстродействие  $t_{пр}$ , нелинейность и др. Разрядность определяет разрешающую способность и характеризуется количеством разрядов кода, которое может выработать АЦП при максимальном значении входного сигнала. Так, у десятиразрядного АЦП при максимальном входном напряжении 10 В шаг квантования не будет превышать  $10/2^{10} = 10/1024$ , или 10 мВ и 0,1%. Наиболее распространенными являются 12- и 16-разрядные АЦП. К шестнадцатиразрядным АЦП можно непосредственно подключать все основные типы первичных преобразователей. При поступлении сигнала на вход АЦП за  $t_{пр}$  на его выходе устанавливается цифровой код. Этот показатель меняется в широких пределах от 0,1 до 100 мкс. Нелинейность АЦП характеризует погрешность реализации уровней квантования, она составляет 0,2...0,05%.

Платы многофункциональных адаптеров ввода-вывода УСО микропроцессоров включают мультиплексоры, АЦП, ЦАП, обеспечивают ввод до 32 аналоговых сигналов с общим проводом и до 16 дифференциальных. Диапазон входных сигналов при 12-разрядном АЦП составляет 0,01...10 В, погрешность преобразования не превышает  $\pm 0,01\%$ , при этом входное сопротивление достигает

10 МОм и более, а частота выборки 1...300 кГц. Двенадцатиразрядный ЦАП обеспечивает выходной сигнал 0...5; 0...10 В при максимальном токе до 5 мА, интегральная и дифференциальная погрешности не превышают  $\pm 0,01\%$ , а время установления выходного сигнала находится в пределах 0,5 мкс. Помимо аналоговых сигналов платы обеспечивают ввод и вывод дискретных и импульсных сигналов.

С распространением распределенных систем управления и контроля, к числу элементов которых относится «Метран-900», выпускаются микропроцессорные модули удаленного ввода-вывода, в которых аналогично коммутатору «Метран-900», производится первичная обработка информации, передающаяся затем по интерфейсу RS-485/232 вторичному измерительному или регулируемому устройству.

**Микропроцессоры.** В настоящее время производятся разнообразные типы микропроцессоров, использующихся в персональных компьютерах, управляющих контроллерах, устройствах обработки аналоговой информации, в бытовых приборах. Если в последних применяются 4—8-разрядные контроллеры, в измерительных приборах — 16-разрядные, то в персональных компьютерах — 32- и даже 64-разрядные. На рис. 8.9 представлена схема микропроцессорного устройства, которое помимо своей центральной части — микропроцессора (МП) включает постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и устройство ввода и вывода данных (УВВ). В ПЗУ хранятся управляющие программы, исходные данные, необходимые для обработки информации и полученные результаты. В ОЗУ информация помещается в процессе ее обработки. УВВ обеспечивают связь микропроцессора с внешними устройствами, которые представляют собой последовательные и параллельные порты, к которым подключаются клавиатура, мышь, принтер, дисплей и другие устройства ввода и вывода данных. МП, ПЗУ, ОЗУ и УВВ соединяются между собой наборами проводников, называемых шинами.

Все операции в МП инициируются импульсами синхронизации от генератора тактовых импульсов, их частота характеризует быстродействие МП. У современных МП значение тактовой частоты составляет 10...200 МГц и выше.

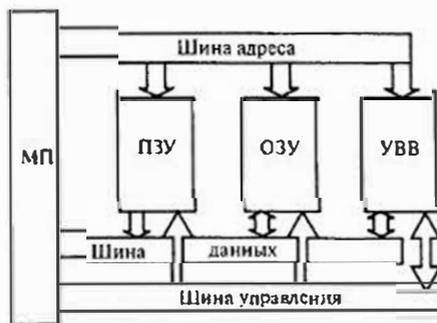


Рис. 8.9. Схема микропроцессорного устройства

### Способы передачи цифровой информации

Передача цифровой информации производится по различным сетям: Internet, Ethernet, Profibus-DP, DeviceNet, Interbus, и др. Каждая из сетей имеет свои особенности, назначение и реализуется на определенном типе кабелей. Увеличение их длины ведет к снижению амплитуды сигнала и скорости передачи информации. Для подключения к сети устройства должны иметь платы с соответствующим цифровым стандартом. Для каждого типа интерфейса и вида кабеля определяется число подключаемых устройств, длина кабеля и снижение скорости передачи. Для увеличения числа подключаемых устройств и длины линии используются повторители. Особенность передачи информации в промышленных системах управления состоит в том, что полевые устройства: первичные средства измерения и управления работают в реальном масштабе времени. В связи с этим применение высокоскоростных шин на полевом уровне требует дополнительных затрат на согласующие элементы.

HART-протокол как способ передачи цифровой информации разработан фирмой Rosemount и занимает промежуточное положение между токовым и чисто цифровым сигналами. В нем осуществляется цифровое усовершенствование токовой петли 4...20 мА за счет использования частотной модуляции токового выходного сигнала измерительных преобразователей. На сигнал 4...20 мА накладываются импульсы переменного тока, причем один период с частотой 1200 Гц соответствует логической единице, а 2200 Гц — логическому нулю (рис. 8.10). Среднее значение наложенных синусоид равно нулю и не влияет на токовый сигнал. Скорость передачи данных невысока и составляет 1,2 кбит/с (1,2 кбод), время обновления данных 2—3 раза в секунду, сопротивление нагрузки 230...1100 Ом, кодовой цепи может подключаться до 15 устройств.

Интерфейс RS-232 является наиболее простым среди RS-интерфейсов. В нем источник и приемник сигналов имеют заземленную точку. Информация передается в виде двухполярных сигналов, единице соответствует  $-3...-15$  В, а нулю от  $3...15$  В. Недостаток этого способа передачи сигнала — низкая помехозащищенность, что приводит к ограничению длины линии связи до 15 м. Скорость передачи составляет несколько десятков кбод, линия связи соединяет источник сигнала с одним приемником.

Интерфейс RS-485, получивший широкое распространение, ориентирован на симметричные дифференциальные линии связи, что обеспечивает возможность использования линий длиной до 1200 м, при скорости передачи в зависимости от длины линии от 100 до  $10^4$  кбод, импульсы сигнала составляют  $\pm 1,5$  В. Для увеличения длины

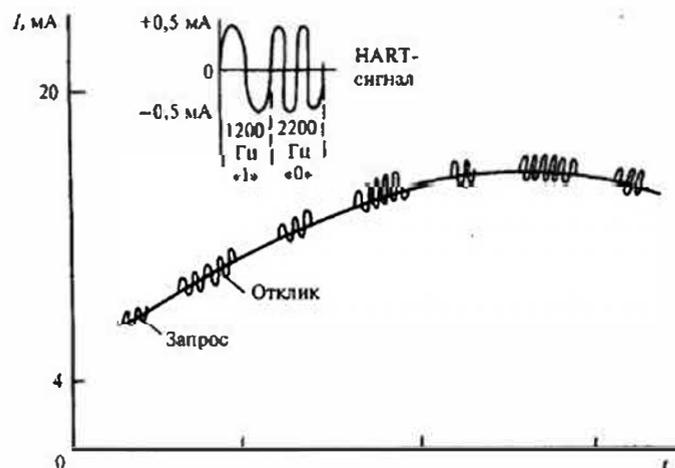


Рис. 8.10. Передача цифровой информации по HART протоколу

линии и числа подключаемых устройств используются специальные повторители. В качестве линий связи применяется витая экранированная пара с подключением на каждый сегмент без повторителя 32 устройств. Возможно использование оптического кабеля.

В системах с территориально-распределенными средствами измерения для передачи информации используются радиоканалы. Радиомодемы, работающие на частотах  $1000 \dots 2500 \text{ МГц}$ , позволяют передать информацию на расстояние до  $5 \text{ км}$ .

Распространение микропроцессорных (интеллектуальных) первичных средств измерения и исполнительных механизмов с их широкими функциональными возможностями привело к созданию открытых распределенных систем управления, включающих высокоскоростную полевую шину (Fieldbus), объединяющую устройства нижнего уровня. Такое техническое решение позволяет сократить длину линий связи, повысить скорость обмена данными. Представителем такой системы является PROFIBUS (Германия). Основой передающей среды в ней служит RS-485.

### Контрольные вопросы

1. Каковы положительные стороны передачи цифровой информации?
2. С возникновением каких погрешностей связано преобразование аналоговой информации в цифровой код?

3. Перечислите общие элементы, присутствующие в рассмотренных цифровых приборах?
4. Какие интерфейсы используются в рассмотренных приборах?
5. В каких устройствах присутствуют дешифраторы и каково их назначение?
6. От чего зависит разрешающая способность АЦП?
7. Сколько импульсов может сосчитать двоичный двенадцатиразрядный счетчик?
8. Каков принцип действия АЦП двойного интегрирования?
9. Как связана разрядность АЦП с погрешностью квантования?

## Глава девятая

### Измерение температуры тел по их тепловому излучению

Все рассмотренные средства измерения температуры (термометры расширения, термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления) предусматривают непосредственный контакт между чувствительным элементом термометра или термопреобразователя и измеряемой средой. Поэтому такие методы называются контактными.

Верхний предел применения контактных методов ограничивается значениями до 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 измеряемой 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 до 4000 °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.

#### 9.1. Основы теории измерения температуры тел по тепловому излучению

Все тела излучают электромагнитные волны различной длины  $\lambda$ .

Если излучение какого-либо тела падает на другое тело, то оно может полностью или частично отражаться от поверхности, поглощаться телом, проходить через тело. Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется *абсолютно черным телом*. Отношение спектральной энергетической яркости любого источника

теплового излучения  $B_{\lambda T}$  к спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела  $B_{0\lambda T}$  при одной и той же длине волны  $\lambda$  и температуре  $T$  называется *спектральным коэффициентом излучения* (*спектральная степень черноты*).

$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{B_{\lambda T}}{B_{0\lambda T}}. \quad (9.1)$$

Полная (интегральная) энергетическая яркость тела  $B_T$  при температуре  $T$  может быть определена по спектральной энергетической яркости при интегрировании по всему диапазону длин волн

$$B_{0T} = \int_0^{\infty} B_{0\lambda T} d\lambda.$$

Отношение полной энергетической яркости  $B_T$  любого источника теплового излучения к полной энергетической яркости  $B_{0T}$  абсолютно черного тела при той же температуре называется *полным коэффициентом излучения* (*интегральной степенью черноты*):

$$\varepsilon_T = \frac{B_T}{B_{0T}}. \quad (9.2)$$

Интенсивность теплового излучения реальных тел зависит от физической природы тела и коэффициента излучения (степени черноты), значение которого определяется температурой и состоянием поверхности. Значение коэффициента излучения изменяется при изменении состояния поверхности и температуры. В силу этого пирометры излучения градуируются по абсолютно черному телу, для которого  $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_T = 1$ . Поэтому при измерении температуры реальных тел, пирометры оценивают некоторую условную температуру. Действительная температура тела рассчитывается по пересчетным формулам с использованием значения коэффициента излучения. В современных пирометрах такой пересчет осуществляется автоматически.

По используемому методу измерения пирометры подразделяются на четыре группы:

- монохроматические (квазимонохроматические);
- полного излучения;
- частичного излучения;
- спектрального отношения.

## 9.2. Монохроматические пирометры

Монохроматические пирометры (иногда называют оптическими или визуальными) воспринимают излучение в столь узком диапазоне длин волн, что оно считается монохроматическим (обычно это излучение красной части спектра с  $\lambda = 0,65$  мкм). Этот участок спектра выделяется светофильтром в сочетании с кривой спектральной чувствительности измерения. В этом случае зависимость энергетической яркости тела от температуры описывается уравнением Планка:

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (9.3)$$

где  $C_1, C_2$  — первая и вторая физические константы излучения;  $\lambda$  — длина волны, м;  $T$  — абсолютная температура, К.

Для малых значений  $\lambda T < 2 \cdot 10^{-3}$  м · К формула Планка (9.3) может быть заменена формулой Вина:

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right). \quad (9.4)$$

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

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

Зависимость спектральной плотности излучения  $M_{0\lambda T}$  абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  для различных значений температуры, построенная по закону Планка (9.3), представлена на рис. 9.1.

$$M_{0\lambda T} = B_{0\lambda T} \pi.$$

В монохроматическом (квазимонохроматическом) пирометре температура тела определяется по спектральной энергетической яркости излучения при определенной длине волны  $\lambda$  и из рис. 9.1 видно, что она увеличивается с ростом температуры. 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 температуру абсолютно черного тела  $T_x$ , при которой спектральные энергетические яркости реального тела  $B_{\lambda T}$  и абсолютно черного тела  $B_{0\lambda T_x}$  будут равны. Условная температура  $T_x$  называется яркостной температурой тела.

Яркостной температурой  $T_x$  называется условная температура реального нечерного тела, численно равная такой температуре абсолютно черного тела, при которой спектральные энергетические яркости абсолютно черного тела  $B_{0\lambda T_x}$  при температуре  $T_x$  и реального тела  $B_{\lambda T}$  при температуре  $T$  равны. Согласно (9.4) можно записать, что  $B_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} B_{0\lambda T}$ , но по определению яркостной температуры  $B_{\lambda T} = B_{0\lambda T_x}$ , откуда

$$B_{0\lambda T_x} = \varepsilon_{\lambda T} B_{0\lambda T}$$

Подставив значения  $B_{0\lambda T_x}$  и  $B_{0\lambda T}$  из (9.4), получим:

$$\frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-C_2/(\lambda T_x)} = \varepsilon_{\lambda T} \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-C_2/(\lambda T)}$$

После несложных преобразований имеем:

$$\frac{1}{T_x} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda T}}, \quad (9.5)$$

где  $\lambda$  — используемая длина волны излучения, мкм;  $C_2 = 14388$  мкм · К (константа излучения);  $\varepsilon_{\lambda}$  — коэффициент излучения на длине волны  $\lambda$ .

Из определения яркостной температуры, а также из выражения (9.5) легко установить, что для реальных тел яркостная температура всегда меньше действительной, так как  $\varepsilon_{\lambda T} < 1$ .

Выражение (9.5) устанавливает связь между действительной температурой тела  $T$  и яркостной температурой  $T_x$ , показываемой пирометром. Из формулы видно, что для определения действительной температуры тела по яркостной температуре необходимо знать длину волны  $\lambda$  и коэффициент теплового излучения  $\varepsilon_{\lambda T}$ . Длина волны, при которой работают большинство квазимонохроматических пирометров, составляет  $(0,655 \pm 0,010)$  мкм. Что касается коэффициента  $\varepsilon_{\lambda T}$ ,

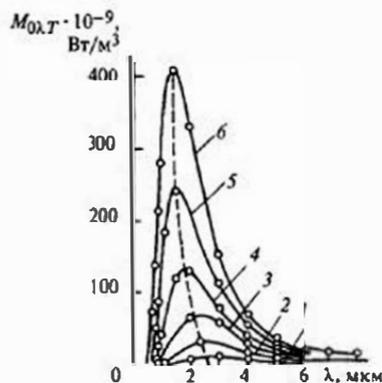


Рис. 9.1. Спектральное распределение плотности излучения для различных значений температуры: 1—6 —  $T = 1000$  К; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000

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. Одним из современных монохроматических пирометров является визуальный пирометр с исчезающей нитью накала. В пирометре использован принцип уравнивания яркости изображения объекта с яркостью пирометрической лампы, находящейся внутри пирометра. Яркость нити изменяется наблюдателем, равенство яркостей воспринимается им как исчезновение нити на фоне контролируемого объекта.

Принципиальная схема квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью представлена на рис. 9.2. 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 видны наблюдателю 6 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 электронный блок 9, который изменяет ток, проходящий через нить пирометрической лампы. Значение тока измеряется цифровым индикатором, отградуированным в значениях яркостной температуры.

Квазимонохроматический пирометр предусматривает измерение температуры по спектральной энергетической яркости тела, т.е.

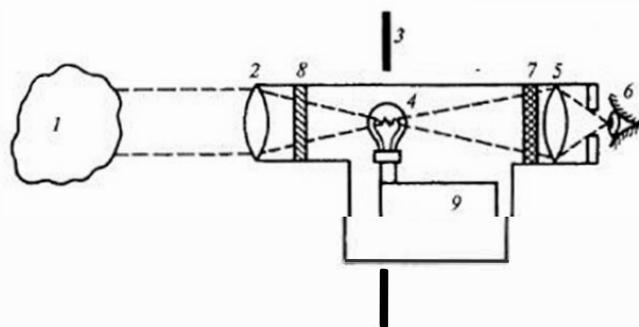


Рис. 9.2. Принципиальная схема квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью накала:

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — плоскость фокусирования; 4 — пирометрическая лампа; 5 — окуляр; 6 — наблюдатель; 7 — красный светофильтр; 8 — поглощающее стекло; 9 — электронный блок

по излучению при определенной длине волны. Для монохроматизации (выделения определенной длины волны) излучения в пирометре устанавливается светофильтр. В принципе он может быть любого цвета (например, красный, зеленый, синий). Обычно применяется красный светофильтр, так как у излучающего тела при низких температурах большая доля энергии приходится на длинноволновый участок спектра (рис. 9.3), поэтому применение красного фильтра позволяет измерять низкие температуры (800...900) °С, где у красного фильтра значительно больше пропускание. Спектральный участок, выделяемый таким фильтром будет более узким, чем спектральный участок зеленого или синего фильтра. На рис. 9.4 приведены кривая видимости (спектральной чувствительности) глаза  $v(\lambda)$  и кривая пропускания красного фильтра  $\tau(\lambda)$ . Глаз воспринимает заштрихованный участок спектра с усредненной длиной волны  $\sim 0,65$  мкм. Кроме того, человеческий глаз воспринимает больше оттенков красного цвета, что позволяет более тщательно устанавливать равенство яркостей объекта и нити пирометрической лампы.

Процесс измерения сводится к изменению наблюдателем накала нити пирометрической лампы (см. рис. 9.2), а значит, и ее яркости до тех пор, пока глаз наблюдателя не перестанет различать нить пирометрической лампы на фоне объекта измерения (нить «исчезает»). И в этот момент производят отсчет значения температуры. Хотя сама нить пирометрической лампы не является абсолютно чер-

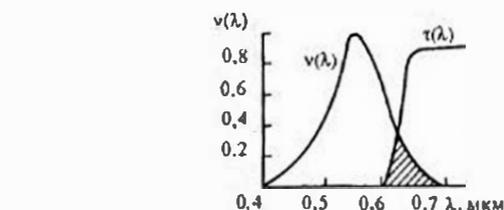
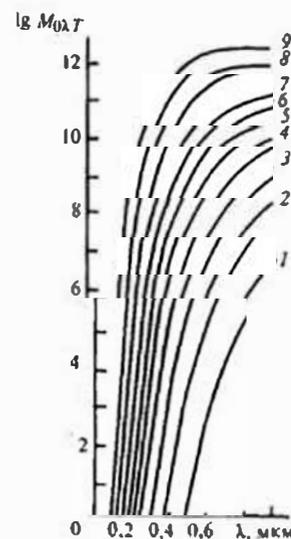


Рис. 9.4. Спектральные характеристики глаза человека  $v(\lambda)$  и красного светофильтра  $\tau(\lambda)$

Рис. 9.3. Спектральное распределение плотности излучения в видимой части спектра и вблизи нее: 1—9 —  $T = 800$  К; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2500; 3000

ным 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 данном накале нити спектральная энергетическая яркость ее излучения соответствует излучению абсолютно черного тела при определенной температуре. Ток накала в пирометре не может быть больше значения, соответствующего яркостной температуре около 1400 °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.

Шкала пирометра, по которой производят измерения без поглощающего стекла, обычно называется основной. Если при введенном поглощающем стекле был проведен отсчет  $T$ , то реальная яркостная температура  $T'$  может быть определена из выражения

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T'} = A, \quad (9.6)$$

где  $A$  — пирометрический коэффициент ослабления,  $K^{-1}$  (он должен быть известен).

Формула (9.6) позволяет произвести градуировку шкал с поглощающими стеклами, при имеющейся градуировке основной шкалы.

Одной из основных составляющих погрешности измерения температуры монохроматическими пирометрами излучения является погрешность за счет неопределенности коэффициента теплового излучения измеряемого тела. Монохроматический коэффициент  $\epsilon_\lambda$  для одного и того же тела в зависимости от состояния поверхности может различаться в 2—3 раза. Отклонение от действительного значения  $\epsilon_\lambda$  может достигать  $\pm(10...20)\%$ . Погрешность при переходе от яркостной температуры к действительной, вызываемой неточностью значения  $\epsilon_\lambda$ , на  $\pm(\Delta\epsilon_\lambda)$ , может быть оценена по формуле

$$\Delta T_\epsilon = -\frac{\lambda_\epsilon}{C} T \left( \frac{\Delta\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \right).$$

В реальных условиях относительная погрешность  $\Delta T_\epsilon/T$  составляет не менее 3%.

Наиболее современным монохроматическим пирометром является визуальный пирометр «Проминь-М» с исчезающей нитью накала. В пирометре использован принцип уравнивания яркости изображения объекта с яркостью пирометрической лампы, находящейся внутри пирометра. Яркость нити изменяется наблюдателем, равенство ярко-

стей воспринимается им как исчезновение нити на фоне контролируемого объекта.

Пирометр имеет цифровую индикацию и два исполнения:

- исполнение 1 с пределами (800...2000) °С с дискретным изменением 1 °С;
- исполнение 2 с пределами (1800...4000) °С с дискретным изменением 2 °С.

Предел допускаемой основной погрешности измерения яркостной температуры изменяется в пределах  $\pm 14$  °С (при температуре 800 °С) до  $\pm 80$  °С (при температуре 4000 °С). Среднеквадратическое отклонение случайной составляющей основной погрешности изменяется соответственно от  $\pm 2,5$  до  $\pm 12$  °С.

### 9.3. Пирометры полного и частичного излучения

*Пирометры полного излучения* (обычно называются радиационными) воспринимают излучение в столь широком спектральном интервале, что зависимость интегральной энергетической яркости от температуры с достаточной точностью описывается законом Стефана—Больцмана, связывающим энергию излучения абсолютно черного тела с его температурой. Эту зависимость можно получить, интегрируя функцию Планка по длинам волн от нуля до бесконечности:

$$B_{0T} = \int_0^\infty B_{0\lambda T} d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda = \sigma T^4. \quad (9.7)$$

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  $T_0$ , при которой интегральные энергетические яркости реального тела и абсолютно черного тела будут равными,

$$B_T = B_{0T_0} \quad (9.8)$$

*Радиационной температурой*  $T_p$  называется условная температура реального тела, численно равная такой температуре абсолютно черного тела, при которой интегральные энергетические яркости

реального и абсолютно черного тела равны. С учетом (9.8) это можно записать следующим образом:

$$\varepsilon_T B_{0T} = B_{0T_p}, \quad (9.9)$$

где  $\varepsilon_T$  — полный коэффициент излучения (интегральная степень черноты).

На основе (9.7)

$$\varepsilon_T \sigma T^4 = \sigma T_p^4,$$

откуда

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}}. \quad (9.10)$$

По определению и из формулы (9.10) следует, что для реальных тел радиационная температура всегда меньше действительной, так как для реальных тел  $\varepsilon_T < 1$ .

Для определения действительной температуры  $T$  по радиационной температуре тела  $T_p$  необходимо знать только значение интегрального коэффициента излучения  $\varepsilon_T$ .

Практическое определение  $\varepsilon_T$  связано с большими трудностями, чем определение  $\varepsilon_{\lambda T}$ . И разброс значений  $\varepsilon_T$  в зависимости от состояния поверхности для одного и того же материала очень велик. Поэтому и ошибки определения действительной температуры тела по его радиационной температуре будут значительными.

Погрешность определения  $\varepsilon_T$  в лучшем случае составляет  $\pm(10...20)\%$ , в некоторых случаях доходит до  $\pm 50\%$ . Погрешность  $\Delta\varepsilon_T$  в определении действительного значения  $\varepsilon_T$  вызовет методическую погрешность в определении действительной температуры реального тела по его радиационной, определяемую по формуле

$$\Delta T_\varepsilon = -\frac{1}{4} T \left( \frac{\Delta\varepsilon_T}{\varepsilon_T} \right).$$

В зависимости от значений  $T$  и  $\Delta\varepsilon_T$  значение  $\Delta T_\varepsilon$  колеблется в пределах  $\pm(3...8)\%$  от значения действительной температуры  $T$ .

Пирометрические преобразователи полного излучения входят в агрегатный комплекс пирометров излучения АПИР-С и могут использоваться для измерения радиационных температур поверхностей в диапазоне  $(30...2500)^\circ\text{C}$ . Пирометрический преобразователь

ППТ состоит из первичного пирометрического преобразователя и вторичного измерительного преобразователя ПВ-О. В первичном преобразователе происходит непосредственное преобразование энергии теплового излучения в электрический сигнал низкого уровня, который в ПВ-О усиливается и преобразуется в унифицированный выходной сигнал. Здесь же могут осуществляться линейризация характеристик, запоминание максимального значения и индикация. Имеется возможность автоматического учета значения коэффициента излучения в интервале от 0,1 до 1,0.

В качестве чувствительного элемента, воспринимающего излучение, могут использоваться различные устройства. Например, можно использовать батарею из нескольких термоэлектрических преобразователей (обычно 10 ТЭП НСХ ХК) или специальных термозависимых резисторов. Для концентрации излучения на спаях термобатареи или на чувствительном элементе терморезистора применяются оптические системы с собирающей линзой. Для того, чтобы получить однозначную зависимость термоЭДС термобатареи (сопротивления терморезистора) от потока излучения, необходимо поддерживать свободные концы термобатареи (или корпус терморезистора) при постоянной температуре.

Принципиальная схема пирометра с термобатареей приведена на рис. 9.5. Излучение от измеряемого тела 1 поступает на объектив телескопа 2 и через диафрагму 3 фокусируется на горячих спаях термобатареи 4, заключенной в специальную колбу.

ТермоЭДС батареи поступает на вход вторичного измерительного преобразователя ПВ-О 5. Для визирования первичного преобразователя на объект измерения служит окуляр 6 и диафрагма 7, через которые наблюдатель 8 осуществляет визирование. Основные

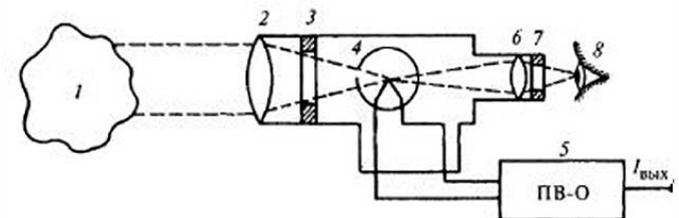


Рис. 9.5. Принципиальная схема пирометра полного излучения с батареей:  
1 — объект измерения; 2 — объектив телескопа; 3, 7 — диафрагма; 4 — термобатарея; 5 — вторичный измерительный преобразователь ПВ-О; 6 — окуляр; 8 — наблюдатель

Таблица 9.1

## Технические характеристики преобразователей полного излучения

Тип	Диапазон применения, °С	Обозначение НСХ	Показатель визирования	Приведенная погрешность, %
ППТ-142	30...300	P-3	1:5	2,0
ППТ-131	100...400	PФ-4А	1:15	2,5
ППТ-131-01	300...600	PФ-6А	1:25	2,5
ППТ-121	400...1500	PК-15А	1:25	2,0
ППТ-131-03	400...1500	PК-15А	1:50	2,0
ППТ-121-01	900...2000	PК-20А	1:50	2,0
ППТ-131-05	900...2000	PК-20А	1:100	2,0
ППТ-121-07	1400...2500	PС-25А	1:50	2,0
ПП-131-07	1400...2500	PС-25А	1:100	2,0

технические данные ППТ приведены в табл. 9.1, где показатель визирования определяет отношение размера излучателя в плоскости перпендикулярной оптической оси к его расстоянию до объектива пирометра.

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 ограниченном интервале длин волн (более узком, чем у пирометров полного излучения). Пирометр, действие которого основано на зависимости энергетической яркости излучения от температуры в ограниченном интервале длин волн, называется *пирометром частичного излучения*.

Теоретического закона, связывающего энергию частичного излучения с температурой тел не существует, поэтому теоретической связи между показаниями пирометров частичного излучения и действительной температурой нет. В силу этого для измерения действительной температуры пирометры должны градуироваться индивидуально. Их целесообразно применять в отраслях промышленности, где достаточен контроль по условной температуре без пересчета ее на действительную (например, производство синтетических материалов, сельское хозяйство). К агрегатному комплексу АПИР-С относятся пирометрические преобразователи частичного излучения типов ПДЧ-121 и ПДЧ-131, предназначенные для измерения температуры тел в диапазоне (450...2500) °С. Пирометрический преобразователь состоит из первичного преобразователя ПЧД и вторичного преобразователя ПВ. В ПЧД энергия излучения в ограниченном

Таблица 9.2

## Технические характеристики преобразователей частичного излучения

Тип	Диапазон применения, °С	Обозначение НСХ	Показатель визирования	Приведенная погрешность, %
ПЧД-121 (131)	800...1300	ДК-13	1:50 (1:100)	2,0
ПЧД-121-01 (131-0)	1000...2000	ДК-20	1:100 (1:200)	1,5
ПЧД-121-02 (131-02)	1500...2500	ДК-25	1:200 (1:300)	1,5 (2,0)
ПЧД-121-03 (131-03)	450...750	ДГ-7,5	1:25 (1:50)	2,0
ПЧД-121-04 (131-04)	700...1100	ДГ-11	1:50 (1:100)	1,5
ПЧД-121-05 (131-05)	600...1300	ДГ-13	1:100 (1:200)	1,0
ПЧД-121-06 (131-06)	1100...1700	ДГ-17	1:200 (1:300)	1,0

диапазоне длин волн преобразуется в электрический сигнал, который в ПВ усиливается и преобразуется в унифицированный сигнал. Здесь же возможна линеаризация характеристики, запоминание максимального значения и индикация результата измерения. Имеется также возможность коррекции выходного сигнала при изменении излучательной способности объекта. Основные технические характеристики блоков (ПЧВ + ПВ) приведены в табл. 9.2.

К ряду пирометров частичного излучения относятся переносные и стационарные микропроцессорные пирометры серии «Смотрич» с повышенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Пирометры имеют цифровую индикацию с дискретностью отсчета 1 °С, диапазон устанавливаемого значения коэффициента излучения (0,1...1,0) с дискретностью 0,01. Области применения различных типов пирометров «Смотрич» следующие: «Смотрич-4П», «Смотрич-5П», «Смотрич-М6П» — переносные пирометры для периодического экспресс-контроля различных технологических процессов. «Смотрич-7» — стационарный пирометр для вакуумных установок, а также для использования в условиях сильных фоновых засветок. Переносные пирометры имеют цифровую индикацию на корпусе прибора. Стационарные состоят из первичных пирометрических преобразователей (с приемником фоторезисторным ПЧР-161, пироэлектрическим ПЧР-161 или термоэлектрическим ПЧТ-162) и вторичных преобразователей (ПВ6 или ПВ7) со сменными программируемыми устройствами.

Таблица 9.3

## Технические характеристики пирометров

Тип	Пределы измерения, °С	Показатель визирования	Пределы основной погрешности
Смотрич-М61П	-35...1100	1:30	$\pm (0,01 \cdot  t  + 1) \text{ } ^\circ\text{C}$
Смотрич-7	150...900	1:150	$\pm 1 \%$
Смотрич-41П	0...1100	1:15 (1:25)	$\pm (1,5 - 2,5) \%$
Смотрич-51П	-35...1100	1:150 (1:250)	$\pm 1 \%$
С-107 (л)	-10...200	От 1:7 до 1:1200	$\pm (2,5) \%$
С-109 (л)	-10...200		
С-115 (л)	100...600		
С-11-200	-10...200		
С-11-600	100...600		

Приведенные в табл. 9.3 пирометры С-107(л), С-109(л) и С-115(л) являются переносными, пирометры С-11-200 и С-11-600 — стационарными. Они также имеют цифровые указатели и специальные устройства наведения. Как видно из рис. 9.1, максимум кривой энергии излучения по спектру смещается в сторону коротких длин волн. Графически эта зависимость представлена штриховой линией на рис. 9.1. Длина волны  $\lambda_{\text{max}}$ , соответствующая максимуму излучения, связана с температурой  $T$  соотношением:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = b,$$

где  $b = 2897 \text{ мкм} \cdot \text{К}$  — постоянная величина.

Эта зависимость называется законом смещения Вина. Смещение максимума излучения приводит к изменению соотношения спектральных энергетических яркостей для двух фиксированных длин волн.

#### 9.4. Пирометры спектрального отношения

Пирометр, действие которого основано на использовании зависимости от температуры тела отношения спектральной энергетической яркости для двух фиксированных длин волн, называется *пирометром спектрального отношения (цветовым)*.

В пирометре спектрального отношения температура тел 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 пиро-

метр градуировался по излучению черного тела, то он покажет температуру абсолютно черного тела  $T_{\text{ц}}$ , при которой отношение спектральных энергетических яркостей реального тела будут равны:

$$B_{\lambda_1 T} / B_{\lambda_2 T} = B_{0\lambda_1 T_{\text{ц}}} / B_{0\lambda_2 T_{\text{ц}}} \quad (9.11)$$

Цветовой температурой  $T_{\text{ц}}$  называется условная температура реального тела численно равная такой температуре 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  $T$ . В соответствии с уравнением (9.11) отношение можно записать в виде

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_1} B_{0\lambda_1 T}}{\varepsilon_{\lambda_2} B_{0\lambda_2 T}} = \frac{B_{0\lambda_1 T_{\text{ц}}}}{B_{0\lambda_2 T_{\text{ц}}}}$$

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 (9.4), получим соотношение между цветовой  $T_{\text{ц}}$  и действительной температурой  $T$

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \frac{\ln \left( \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \right)}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

Таким образом, определяя действительную температуру  $T$  по ее цветовой температуре  $T_{\text{ц}}$ , показываемой пирометром, необходимо знать длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , при которых вычисляется отношение спектральных энергетических яркостей и отношение коэффициентов излучения  $\varepsilon_{\lambda_1} / \varepsilon_{\lambda_2}$ . Для тел, у которых при  $\lambda_2 > \lambda_1$   $\varepsilon_{\lambda_2} < \varepsilon_{\lambda_1}$  (большинство металлов),  $T_{\text{ц}} > T$ . Для тел, у которых при  $\lambda_2 > \lambda_1$   $\varepsilon_{\lambda_2} > \varepsilon_{\lambda_1}$  (многие неметаллические тела),  $T_{\text{ц}} < T$ . При  $\varepsilon_{\lambda_2} = \varepsilon_{\lambda_1}$  цветовая температура равна действительной. Это обуславливает достоинство цветового метода измерения, поскольку яркостная и радиационная температура всегда меньше действительной.

При погрешности в оценке  $\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$  на  $\Delta(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})$  возникает погрешность  $\Delta T$  в определении действительной температуры  $T$ , которую можно определить по формуле:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \cdot \frac{\Delta(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}{(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}$$

При оценке отношения  $\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$  ошибка меньше, чем при определении отдельно  $\varepsilon_{\lambda_1}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2}$ , их отношение изменяется незначительно.

Поэтому изменение показаний цветowego пирометра будет незначительно. Кроме того, отличие цветовой температуры от действительной также незначительно.

Одна из схем пирометра спектрального отношения представлена на рис. 9.6. 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  $5$ . Под влиянием света на фотоэлементе возникает фотоЭДС  $U_{\lambda_1}$ . Другая часть светового потока частично пропускается фильтром  $3$ , отражается от внутренней плоскости и через зеркало  $6$  направляется на фотоэлемент  $7$ , на котором воз-

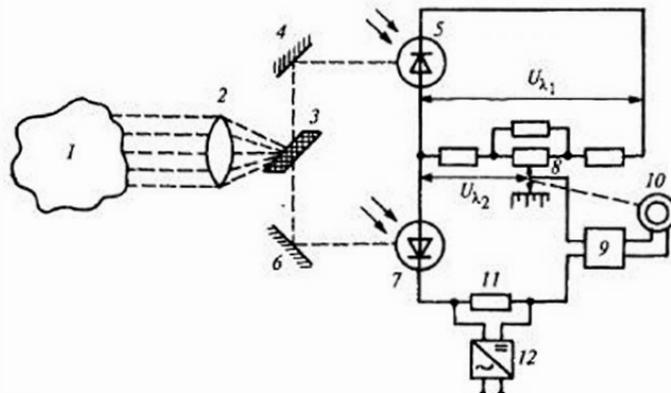


Рис. 9.6. Принципиальная схема пирометра спектрального отношения:  $1$  — объект измерения;  $2$  — объектив;  $3$  — фильтр;  $4, 6$  — зеркало;  $5, 7$  — фотоэлементы;  $8$  — реохорд;  $9$  — усилитель;  $10$  — реверсивный двигатель;  $11$  — резистор;  $12$  — стабилизатор напряжения

никает фотоЭДС  $U_{\lambda_2}$ . Эффективная длина волны отраженного фильтром  $3$  излучения составляет  $\lambda_1 = 0,888$  мкм, а длина волны излучения, прошедшего через фильтр  $3$ ,  $\lambda_2 = 1,034$  мкм. Выходное напряжение  $U_{\lambda}$  фотоэлемента  $7$  уравнивается частью выходного напряжения фотоэлемента  $5$  на реохорде  $8$  компенсатора на напряжений. Положение движка реохорда  $8$  пропорционально отношению  $U_{\lambda_2}/U_{\lambda_1}$ , т.е. пропорционально отношению спектральных энергетических яркостей  $B_{0\lambda_2 T_u} / B_{0\lambda_1 T_u}$ , определяемое цветовой температурой  $T_u$  измеряемого тела. Если  $U_{\lambda_1}, U_{\lambda_2}$  не уравновешено на реохорде  $8$ , то на вход усилителя  $9$  поступает сигнал, вращающий реверсивный двигатель  $10$ , перемещающий движок реохорда  $8$  до наступления уравновешивания. В цепь фотоэлемента  $7$  дополнительно подается опорное напряжение к резистору  $11$  от стабилизатора  $12$ . На рис. 9.7 представлена упрощенная блок-схема пирометра «Спектропир», являющегося наиболее совершенным. В качестве приемников излучения используются германиевые и кремневые фотодиоды  $1$  и  $2$ . Разделение поступающего от объекта потока излучения осуществляется светоделительным фильтром  $3$ . Каждый из фотодиодов включен в свой измерительный канал с предварительными усилителями  $4$  и  $5$ . Сигналы с обоих усилителей поступают в устройство преобразования УП, в котором производится вычисление отношения сигналов от фотодиодов. В УП размещены также блоки унифицированных сигналов (токовых или напряжения).

Технические данные пирометров «Спектропир» приведены в табл. 9.4.

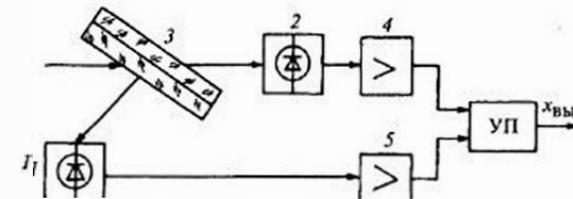


Рис. 9.7. Блок-схема пирометра «Спектропир»:  $1, 2$  — фотодиоды;  $3$  — светоделительный фильтр;  $4, 5$  — предварительные усилители; УП — вторичный преобразователь

Таблица 9.4

Технические характеристики пирометров «Спектропир»

Тип	Пределы измерения, °С	Показатель визирования	Пределы основной погрешности, %
Спектропир П2-001	600...1000	1:25	± 1,5
Спектропир П2-002	900...2200	1:50	± 1,5
Спектропир П1-001	600...1000	1:50	± 2,0
Спектропир П1-002	900...1300	1:100	± 2,0
Спектропир П1-003	1200...1600	1:100	± 2,0
Спектропир П1-004	1400...2200	1:200	± 2,0
Спектропир П1-005	2000...2800	1:200	± 2,0

### 9.5. Методика применения пирометров излучения

Рассмотрим преимущества и недостатки методов измерения температуры тел по излучению:

- 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;
- верхний предел измерения некоторых пирометров излучения не ограничен;
- все методы очень чувствительны.

Изменение спектральной энергетической яркости в видимой части спектра составляет  $(10^3 \dots 10^{10}) \Delta T/T$ , а интегральной энергетической яркости — примерно  $(\Delta T/T)^4$ . Для отношения спектральных энергетических яркостей в видимой части спектра изменение может составлять  $(10 \dots 10^3) \Delta T/T$ .

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

$$|T - T_{\text{ц}}| < T - T_{\text{я}} < T - T_{\text{р}}$$

Пирометры излучения применяются без ограничения при измерении температуры твердых тел и ряда жидких сред, имеющих непрерывный спектр излучения. Эти методы используются и для измерения температуры газов, содержащих линейчатый спектр излучения. Однако при измерении температуры газов по излучению необходимо так подобрать характеристики пирометра, чтобы полоса пропус-

кания оптической системы практически совпадала с одной из полос излучения данного газа.

Основной источник погрешности измерения действительной температуры тела пирометрами излучения — большая погрешность в оценке коэффициента излучения и его изменение в процессе измерения (данная погрешность классифицируется как методическая). Эта погрешность наибольшая у пирометров полного излучения и наименьшая — у пирометров спектрального отношения. Поскольку оперативное измерение коэффициентов излучения практически невозможно, часто при использовании пирометров искусственно создаются условия, приближающиеся к абсолютно черному телу. Например, при измерении температуры поверхностей используются керамические блоки, встроенные в эти поверхности.

При измерении температуры жидких и газовых сред применяются погруженные в эти среды огнеупорные трубки, на доньшко которых визируется оптика пирометров. При определенной степени шероховатости блока или стенок трубки и при малом отношении диаметра трубки к ее длине, коэффициент излучения этих тел принимается равным единице. В этом случае показания пирометра соответствуют действительной температуре. При измерении температуры пирометрами излучения могут иметь место погрешности за счет влияния промежуточной среды. Ослабление теплового излучения промежуточной среды, находящейся между объектом измерения и пирометром, влияет на результаты измерения всех пирометров. Однако степень этого влияния может быть различной. Например, запыленность и задымленность 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.

В монохроматических пирометрах влияние 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, состоящая из частиц, размеры которых меньше, чем эффективная длина волны (0,65 мкм), будет оказывать влияние на результаты измерения. Существенное влияние на показания пирометров полного излучения оказывают водяные пары и углекислый газ, находящиеся в промежуточной среде, причем в области пропускания оптики пирометров находится несколько полос поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ .

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

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.

### Контрольные вопросы

1. Как связаны спектральные энергетические яркости физического и абсолютно черного тела?
2. Почему при измерении температуры физического тела по излучению измеряются условные температуры?
3. Какие разновидности пирометров излучения вы знаете?
4. Сопоставьте соотношения, связывающие яркостную и цветовую температуры с истинной температурой физического тела.
5. Перечислите факторы, обеспечивающие измерение монохроматической энергетической яркости тела в оптических пирометрах.
6. Для каких тел цветовая температура совпадает с истинной?

## Раздел третий ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, УРОВНЯ И РАСХОДА

### Глава десятая МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

#### 10.1. 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 — широкое понятие, характеризующее 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 основных параметров состояния. Единица измерения давления в системе СИ — Паскаль (Па), равный 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. 10.1 приведены перечисленные единицы давления и соотношения между ними. В зарубежной литературе встречаются следующие единицы измерения давления: 1 inch = 25,4 мм вод. ст., 1 psi = 0,06895 бар.

Воспроизведение единицы измерения давления с наивысшей точностью в области избыточных давлений  $10^6 \dots 2,5 \cdot 10^8$  Па осуществляется первичным эталоном, включающим грузопоршневые манометры, специальный набор мер массы и установку для поддержания давления. Для воспроизведения единицы давления вне указанного

Таблица 10.1

## Единицы измерения давления

Единицы измерения	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

диапазона от 10<sup>-8</sup> до 4 · 10<sup>5</sup> Па и от 10<sup>9</sup> до 4 · 10<sup>9</sup>, а также разности давлений до 4 · 10<sup>4</sup> Па используются специальные эталоны. Передача единицы измерения давления от эталонов рабочим средствам измерения выполняется многоступенчато. Последовательность и точность передачи единицы измерения давления к рабочим средствам с указанием способов поверки и сравнения показаний определяются общегосударственными поверочными схемами (ГОСТ 8.017-79, 8.094-73, 8.107-81, 8.187-76, 8.223-76). Поскольку на каждой ступени передачи единицы измерения погрешности возрастают в 2,5—5 раз, то соотношение между погрешностями рабочих средств измерения давления и первичного эталона составляют 10<sup>2</sup>...10<sup>3</sup>.

При измерениях различают абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление. Под *абсолютным давлением*  $p$ , понимают полное давление, которое равно сумме атмосферного давления  $p_{ат}$  и избыточного  $p_{из}$ :

$$p_a = p_{из} + p_{ат}$$

Понятие *вакуумметрического давления* вводится при измерении давления ниже атмосферного:  $p_{в} = p_{ат} - p_{из}$ . Средства измерения, предназначенные для измерения давления и разности 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 *напорометрами* и *тягомерами*. Тягонапорометры 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, электрические, ионизационные, тепловые и грузопоршневые.

Устройство перечисленных приборов давления разнообразно. Среди них можно выделить пять основных групп измерительных приборов и преобразователей, выпускаемых отечественной промышленностью: механические, с дифференциально-трансформаторными преобразователями, с компенсацией магнитных потоков, с силовой компенсацией и с тензопреобразователями. 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. 10.2. Для перехода от МПа

Таблица 10.2

## Пределы измерения приборов давления

Прибор	Единица измерения	Предел измерения	
		нижний	верхний
Манометры	МПа	0	(0,6; 1; 1,6; 2,5; 4) · 10 <sup>n</sup> , $n = -1; 0; 1; 2; 3$
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	(10; 16; 25; 40; 60) · 10 <sup>n</sup> , $n = -1; 0; 1$
	МПа	0	(1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16) · 10 <sup>n</sup> , $n = -2; -1$
Напорометры, дифманометры-напорометры	кПа	0	(1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40) · 10 <sup>n</sup> , $n = -1; 0$
Тягомеры, дифманометры-тягомеры	кПа	-(1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40) · 10 <sup>n</sup> , $n = -1; 0$	0
Тягонапорометры, дифманометры-тягонапорометры	кПа	-(0,8; 1,25; 2; 3; 5; 8; 12,5; 20) · 10 <sup>n</sup> , $n = -1; 0$	(0,8; 1,25; 2; 3; 5; 8; 12,5; 20) · 10 <sup>n</sup> , $n = -1; 0$
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) · 10 <sup>n</sup> , $n = -1$

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 10<sup>2</sup>.

Манометры и дифманометры выпускаются многими заводами в РФ и СНГ, это концерн «Метран» (г. Челябинск), завод «Манометр», «Манометр-сервис», ВНИИА (г. Москва), «Манотомь» (г. Томск), «Орлэкс» (г. Орел), «Теплоконтроль» (г. Казань), «Теплоприбор» (г. Рязань), «Усть-Каменогорский завод пневмоавтоматики» (г. Усть-Каменогорск), НИИФИ (г. Пенза), «Саранский приборостроительный завод» (г. Саранск), ПК «Альтернатива» (г. Шатки Новгородской обл.), «Голынковский завод специзделий» (г. Голынковск Новгородской области), «Промприбор» (г. Ивано-Франковск) и др. Манометры выпускают все крупнейшие фирмы, работающие в области создания промышленных систем управления и технических средств автоматизации, такие как Siemens, Rosemount, Foxboro, Honeywell, Jokogawa и др. В РФ получили широкое распространение манометры, выпускаемые такими специализированными фирмами как Wika, Jumo. В конце учебника приведены адреса сайтов этих заводов и фирм, в которых дана номенклатура выпускаемых манометров и их технические характеристики.

## 10.2. Жидкостные манометры и дифманометры

В жидкостных манометрах измеряемое давление или разность давлений уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости. В приборах используется принцип сообщающихся сосудов, в которых уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними, 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 положению которого определяется значение измеряемого давления. Эти приборы используются в лабораторной практике и в некоторых отраслях промышленности.

Существует группа жидкостных дифманометров, в которых 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.

**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. 10.1, а. Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1, 2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреплена 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  $h$ , м, уравнивает разность давлений в Па

$$p_1 - p_2 = \rho gh; h = 1/\rho g(p_1 - p_2) \quad (10.1)$$

где  $\rho$  — плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — местное ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

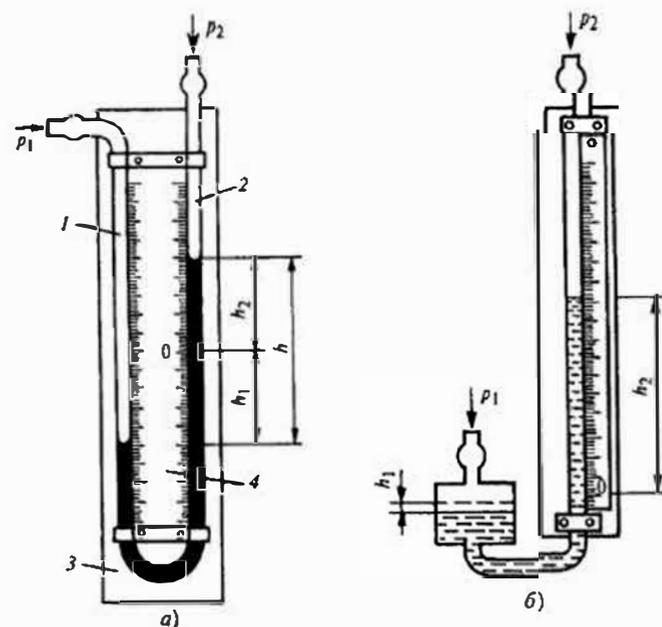


Рис. 10.1. Схемы двухтрубного (а) и однотрубного (б) манометра: 1, 2 — вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки; 3 — основание; 4 — шкальная пластинка

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 (10.1) крутизна статической характеристики зависит от плотности рабочей жидкости. С увеличением плотности чувствительность (коэффициент преобразования) снижается, поскольку  $S = \Delta h / \Delta p = 1 / (\rho g)$ .

Если плотность среды над рабочей жидкостью соизмерима с плотностью последней, то выражение (10.1) видоизменяется:

$$p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho_2)gh = g(\rho_1 - \rho_2)(h_1 + h_2), \quad (10.2)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  — 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 применяются для измерения давления, разрежения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в диапазоне до  $\pm 10$  кПа. Заполнение манометра ртутью измерения расширяет пределы до 0,1 МПа, при этом измеряемой средой может быть вода, неагрессивные жидкости и газы.

При использовании жидкостных манометров для измерения разности давлений сред, находящихся под статическим давлением до 5 МПа, в конструкцию приборов вводятся дополнительные элементы, предназначенные для защиты прибора от одностороннего статического давления и проверки начального положения уровня рабочей жидкости.

Согласно выражению (10.2) 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  $h_2$ .

Если шкала жидкостного манометра градуируется в миллиметрах, то измеряемое давление рассчитывается по выражениям (10.1), (10.2) с использованием значений плотности рабочей жидкости и среды над ней, местного ускорения свободного падения  $g$ , для Москвы  $g = 9,8155 \text{ м/с}^2$ .

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 расширение температурных коэффициентов расширения шкалы, стекла и рабочего вещества.

**Однотрубные манометры.** Для повышения точности отсчета разности высот уровней используются однотрубные (чашечные) манометры (см. рис. 10.2, б). У однотрубного 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. Поскольку объем жидкости, вытесненный из широкого сосуда, равен объему жидкости, поступившему в измерительную трубку,

$$h_1 F = h_2 f, \quad h_1 = h_2 f / F, \quad (10.3)$$

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 при измерениях учитывают только изменение уровня в измерительной трубке, а изменением уровня в широком сосуде пренебрегают. Если для повышения точности измерения необходимо учесть это изменение, то шкала градуируется в единицах давления в соответствии с уравнением

$$p_1 - p_2 = \rho g(h_1 + h_2) = \rho g h_2 (f/F + 1). \quad (10.4)$$

Измерение в однотрубных манометрах высоты только одного столба рабочей жидкости приводит 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 ней, температурными расширениями элементов прибора, являются общими для всех жидкостных манометров.

У двухтрубных и однострунных манометров основной погрешностью является погрешность считывания разности уровней. При одной и той же абсолютной погрешности приведенная погрешность измерения давления снижается при увеличении верхнего предела измерения манометров. Минимальный диапазон измерения однострунных 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 ( $300 \text{ кгс/м}^2$ ) используются микроманометры, которые являются разновидностью однострунных 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 распространенные лабораторные микроманометры — это микроманометры типа ММН с наклонной измерительной трубкой (рис. 10.2). 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  $h_1 F = n f$ ,  $h_1 = n f / F$ , где  $h_1$  — изменение уровня в широком сосуде;  $F, f$  — площади поперечного сечения широкого сосуда и трубки. Поскольку  $h_2 = n \sin \alpha$ ,

$$p_1 - p_2 = \rho g(h_1 + h_2) = \rho g n (f/F + \sin \alpha). \quad (10.5)$$

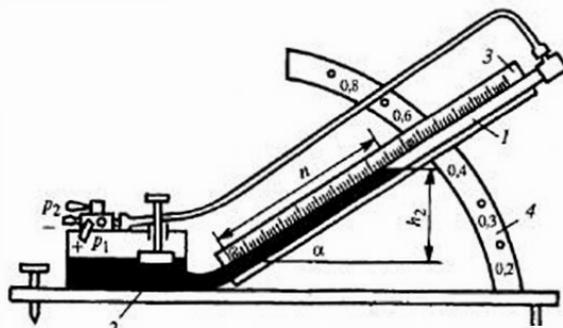


Рис. 10.2. Схема микроманометра ММН:

1 — измерительная трубка; 2 — сосуд; 3 — кронштейн; 4 — сектор

При определенной плотности рабочей жидкости  $\rho_p$ , в качестве которой обычно используют спирт, и нормальном ускорении свободного падения  $g_n$  (равное  $9,80665 \text{ м/с}^2$ ) все сомножители при  $n$  в выражении (10.5) 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. 10.2 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 ( $60 \text{ кгс/м}^2$ ) до 2,4 кПа ( $240 \text{ кгс/м}^2$ ). Приведенная погрешность измерений не превышает 0,5%. Минимальная цена деления при  $k = 0,2$  составляет 2 Па ( $0,2 \text{ кгс/м}^2$ ), 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  $\pm 0,05 \text{ мм}$  в результате использования оптической системы для установления начального уровня и микрометрического винта для измерения высоты столба рабочей жидкости, уравновешивающего измеряемое давление или разность давлений.

**Барометры** применяются для измерения атмосферного давления. Наиболее распространенными являются чашечные барометры с ртутным заполнением, отградуированные в мм рт. ст. (рис. 10.3). Погрешность считывания высоты столба не превышает 0,1 мм, что достигается использованием нониуса 1, совмещаемого с верхней частью мениска ртути. При более точном измерении атмосферного

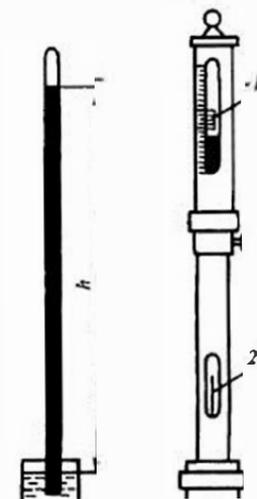


Рис. 10.3. Схема чашечного ртутного барометра: 1 — нониус; 2 — термометр

давления необходимо вводить поправки на отклонение ускорения свободного падения от нормального и значение температуры барометра, измеряемой термометром 2. При диаметре трубки менее 8...10 мм учитывается капиллярная депрессия, обусловленная поверхностью натяжением ртути.

**Компрессионные манометры** (манометры Мак—Леода), схема которых представлена на рис. 10.4 [20], содержат резервуар 1 с ртутью и 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 в результатах измерения не сказывалось влияние капиллярных сил. Давление в резервуаре 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, трубку 5, капилляр 6, и ртуть сливается в резервуар. Затем кран 7 плавно переводится в положение *c*. Поскольку атмосферное давление значительно превышает измеряемое  $p$ , ртуть вытесняется в трубку 2. При достижении ртути устья баллона 8, отмеченного на схеме точкой *O*, от измеряемой среды отсекается объем газа  $V$ , находящийся в баллоне 3 и измерительном капилляре 4. Дальнейшее повышение уровня ртути сжимает отсеченный объем. При достижении ртути в измерительном капилляре высоты  $h_n$  выпуск 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:

$$p_n - p = \rho g(h_c - h_n), \quad (10.6)$$

где  $p_n, p$  — давление в измерительном капилляре 4 и измеряемое.

Давление по закону Бойля—Мариотта определяется выражением

$$p_n = pV / [(h_0 - h_n)f], \quad (10.7)$$

где  $f$  — сечение измерительного капилляра.

Подставляя значение  $p_n$  в выражение (10.6), получаем уравнение измерения компрессионного манометра

$$p = f\rho g(h_0 - h_n)(h_c - h_n) / [V - (h_0 - h_n)f]. \quad (10.8)$$

В уравнении (10.8) все величины являются постоянными кроме высоты ртути в капилляре сравнения  $h_c$ , который определяет измеряемое давление.

Нижний предел измерения компрессионных манометров составляет  $10^{-3}$  Па ( $10^{-5}$  мм рт. ст.), погрешность не превышает  $\pm 1\%$ . У приборов пять диапазонов измерения и 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  $10^{-3} \dots 10^3$  Па.

Достоинствами рассмотренных 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.

### 10.3. Деформационные манометры и дифманометры

В деформационных манометрах используется зависимость деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления. Пропорциональная давлению деформация или сила преобразуются в показания или соответствующие измене-

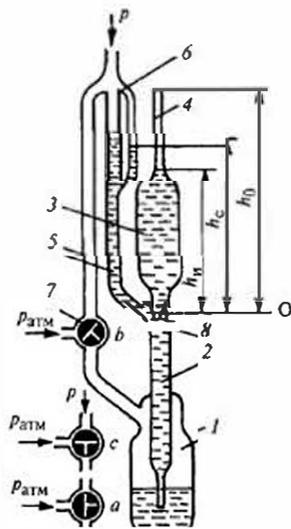


Рис. 10.4. Схема компрессионного манометра:

1 — резервуар; 2, 5 — трубки; 3 — измерительный баллон; 4 — глухой измерительный капилляр; 6 — капилляр сравнения; 7 — трехходовой кран; 8 — устье баллона

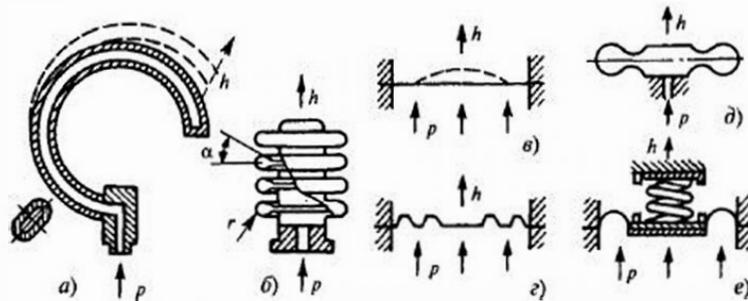


Рис. 10.5. Упругие чувствительные элементы:

а — трубчатые пружины; б — сильфоны; в, г — плоские и гофрированные мембраны; д — мембранные коробки; е — вялые мембраны с жестким центром

ния 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. 10.5. К их числу относятся трубчатые пружины, сильфоны, плоские и гофрированные мембраны, мембранные коробки, вялые мембраны с жестким центром.

Статической (упругой) характеристике чувствительного элемента, связывающей перемещение рабочей точки с давлением, присуще наличие начальной зоны пропорциональных перемещений, 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 жесткостью по силе:

$$k_F = F/h = pS_3/h,$$

где  $F$ ,  $S_3$  — сила, действующая на упругий чувствительный элемент (перестановочное усилие), и эффективная площадь элемента;  $h$  — перемещение рабочей точки.

Полые одновитковые *трубчатые пружины* (см. рис. 10.5, 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 трубчатая пружина деформируется: малая ось сечения трубки увеличивается, 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* (см. рис. 10.5, б) — это тонкостенная трубка 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 технологии изготовления сильфонов, они получили широкое распространение в манометрах и дифманометрах с силовой компенсацией.

Наиболее разнообразными по конструкции являются мембранные чувствительные элементы. Представленная на рис. 10.5, в, плоская или пластинчатая мембрана представляет собой гибкую тонкую пластину, закрепленную по окружности. Под влиянием 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), поверхностные деформации (тензопреобразователи) и малые перемещения (емкостные и резонансные преобразователи). Преобразователи с такими чувствительными элементами рассмотрены в разделе электрических манометров.

Для улучшения статической характеристики используют гофрированные мембраны и мембранные коробки (см. рис. 10.5, г, д). Профили мембран могут быть пильчатыми, трапецидальными,

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.

Для измерения малых давлений применяются вялые мембраны (см. рис. 10.5, е), изготовленные из бензомаслостойкой прорезиненной ткани. В центре мембраны крепятся металлические пластины, в одну из которых упирается винтовая пружина, выполняющая функции 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 чувствительных элементов деформационные манометры подразделяются на пружинные, сильфонные и мембранные, разновидности этих групп приборов показывающих и с дистанционной передачей показаний рассмотрены ниже.

#### **Показывающие манометры (механические)**

Большинство показывающих, самопишущих и сигнализирующих манометров с трубчатой пружиной являются устройствами прямого преобразования, в которых давление последовательно преобразуется в перемещение чувствительного элемента и связанного с ним механически показывающего, регистрирующего или контактного устройства.

**Рис. 10.6.** Пружинный показывающий манометр

1 — одновитковая трубчатая пружина; 2 — держатель; 3 — пробка; 4 — поводок; 5 — зубчатый сектор; 6 — шестерня; 7 — стрелка

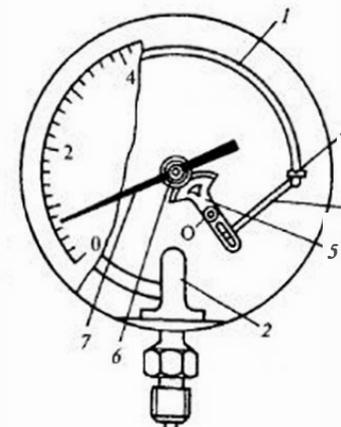


Схема показывающего пружинного манометра представлена на рис. 10.6. Одновитковая трубчатая пружина 1 с одного конца приварена к держателю 2, прикрепленному к корпусу манометра. Нижняя часть держателя заканчивается шестигранной головкой и штуцером, с помощью которого к манометру подсоединяется трубка, подводящая давление. Свободный конец пружины 1 припаян к пробке 3, шарнирно соединенной с поводком 4.

При перемещении свободного конца пружины поводок поворачивает зубчатый сектор 5 относительно оси О, вызывая поворот шестерни (трибки) 6 и сидящей на одной оси с ней показывающей стрелки 7. Пружина, не приведенная на рисунке, обеспечивает поджатие зубцов трибки к зубцам сектора, убирая люфт. Статическая характеристика манометра может подстраиваться за счет изменения точки закрепления поводка 4 в прорези сектора 5 и смещения положения стрелки, устраняя мультипликативную и аддитивную погрешности. На рис. 10.6 показано радиальное размещение штуцера. Манометры также изготавливаются с его осевым размещением.

Пружинные показывающие манометры выпускаются с верхним пределом измерения от 0,1 МПа ( $1 \text{ кгс/см}^2$ ) до  $10^3$  МПа ( $10^4 \text{ кгс/см}^2$ ) 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.

Для сигнализации предельных отклонений давления в цепях защиты и позиционного регулирования широко применяются электроконтактные манометры. Схема манометра типа ЭКМ представлена на рис. 10.7. В показывающий манометр дополнительно введены две стрелки 2, 3, к которым упругими токоподводами поджаты элект-

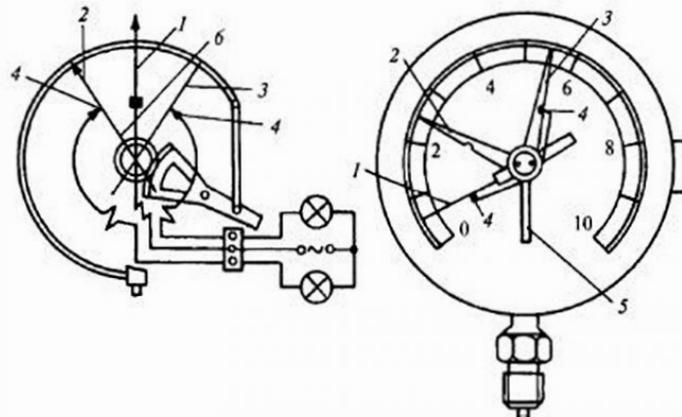


Рис. 10.7. Электроконтактный манометр:  
1 — показывающая стрелка; 2, 3 — стрелки; 4 — электрические контакты; 5 — поводок; 6 — электрический контакт

трические контакты 4. Стрелки 2, 3 с помощью торцевого ключа и поводка 5 устанавливаются против значений сигнализируемого 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.

Для целей сигнализации и позиционного регулирования используются реле давления типа РД, которые не имеют показывающей шкалы и имеют верхние пределы измерения в диапазоне 12—1600 кПа. Их настройка на верхний или нижний предел срабатывания производится по показаниям контрольного манометра. Разрывная мощность контактов при активной нагрузке составляет 10 Вт (ф. «Метран»).

Промышленно выпускаются механические показывающие и самопишущие манометры (МТП, МТС), вакуумметры (ВТП, ВТС) и мановакуумметры (МВТП, МВТС) с одновитковой трубчатой пружинной.

жинной. Самопишущие приборы имеют дисковую диаграмму, совершающую один оборот за 8, 12 или 24 ч, ее вращение осуществляется электрическим двигателем или часовым механизмом, имеющим 8-суточный завод. Класс точности манометров 1; 1,5; 2,5.

Сильфонные чувствительные элементы используются в механических показывающих и самопишущих дифманометрах типа ДСП и ДСС. Схема их чувствительного элемента, представляющего сильфонный блок, дана на рис. 10.8, а, на рис. 10.8, б приведен внешний вид дифманометра с вентильным блоком. Под действием разности давлений рабочий сильфон 1, расположенный в плюсовой камере дифманометра, сжимается и кремнийорганическая жидкость 2, заполняющая внутреннюю полость сильфона 1, частично вытесняется во внутреннюю полость сильфона 3, находящегося в минусовой камере дифманометра. При этом перемещается шток 4, жестко соединенный с дном сильфона 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 торсиона 8, отделяющего внутреннюю полость дифманометра от атмосферы, поворачивает ось 9, связанную с записываю-

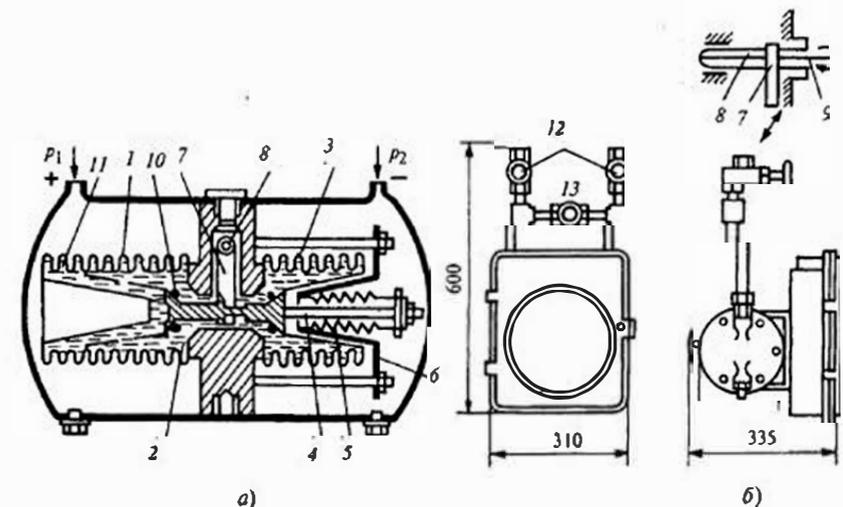


Рис. 10.8. Сильфонный дифманометр типа ДС:

а — схема сильфонного блока; б — внешний вид; 1 — рабочий сильфон; 2 — кремнийорганическая жидкость; 3 — внутренняя полость сильфона; 4 — шток; 5 — пружины; 6 — неподвижный стакан; 7 — рычаг; 8 — торсион; 9 — ось; 10 — резиновые юльща; 11 — гофры; 12, 13 — вентили запорные и уравнительный

щим или показывающим устройством. Резиновые 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 снабжаются вентиляльным блоком, включающим запорные вентили 12 и уравнильный 13. Подключение к объекту измерения дифманометра с открытым уравнильным вентилем позволяет исключить воздействие одностороннего рабочего давления на чувствительный элемент. При закрытых вентилях 12 и открытом 13 указатель дифманометра должен находиться на начальной отметке, что используется при проверке его работоспособности и настройке.

Дифманометры ДС могут иметь сигнализирующее устройство и пневматические преобразователи. Привод диаграммной бумаги при регистрации показаний, как и в манометрах МТС, производится синхронным двигателем или часовым механизмом. Дифманометры имеют верхний предел измерения от 6,3 кПа до 0,16 МПа при рабочем давлении 16 и 32 МПа, класс точности 1; 1,5. Дифманометры-расходомеры, работающие с сужающими устройствами, могут иметь манометрическую часть, производящую регистрацию статического давления до 32 МПа, и интегратор для суммирования расхода.

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. 10.9. Измеряемое давление

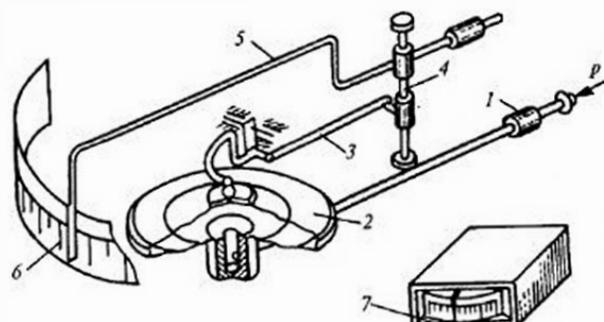


Рис. 10.9. Схема и внешний вид профильного мембранного напоромера НМП:

1 — штуцер; 2 — мембранная коробка; 3 — система рычагов и тяг; 4 — ось; 5 — показывающая стрелка; 6 — профильная шкала; 7 — корректор

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 коробки 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 приборов достигает 25 кПа в соответствии со стандартным рядом при классе точности 1,5; 2,5.

С использованием мембранных чувствительных элементов выпускаются реле (сигнализаторы) напора и тяги типа РД, которые работают в диапазоне от -12 до 12 кПа.

#### 10.4. Деформационные преобразователи давления с дистанционной передачей показаний

Для передачи информации об измеряемом давлении на расстояние рабочая точка упругих чувствительных элементов соединяется с элементом электрического или пневматического преобразователя, создающего соответствующие унифицированные сигналы, которые поступают на удаленные вторичные устройства (см. гл. 7, 8). К их числу относятся показывающие и регистрирующие вторичные приборы, средства управления и защиты.

##### Дифференциально-трансформаторные преобразователи и системы

Дифференциально-трансформаторная система использует для передачи информации сигналы переменного тока. Хотя эта система была разработана задолго до введения токовых и частотных способов передачи информации, но она до сих пор применяется, благодаря простоте устройства и надежности. Первичными преобразователями этой системы являются манометры с одновитковой трубчатой пружиной типа МЭД, мембранные дифманометры типа ДМ, колокольные дифманометры типа ДК. В комплекте с этими первичными преобразователями работают вторичные показывающие и регистрирующие приборы типа КСД и другие устройства, рассчитанные на использование унифицированного сигнала взаимной индуктивности 0...10 мГн.

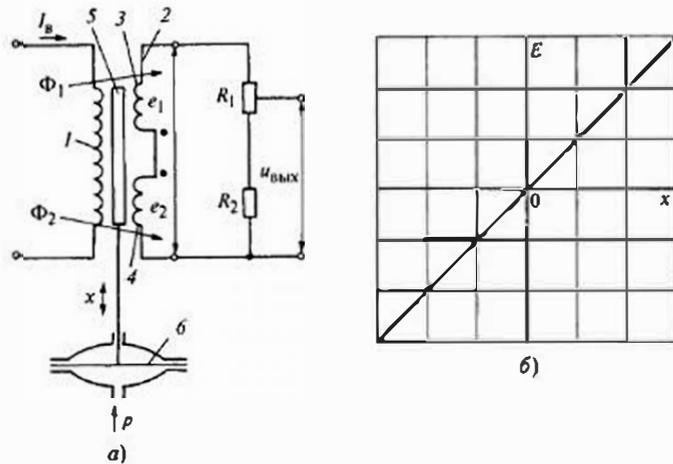


Рис. 10.10. Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя (а) и график выходного сигнала (б):

1 — обмотка возбуждения; 2 — вторичная обмотка; 3, 4 — две включенных встречно полуобмотки; 5 — ферромагнитный сердечник; 6 — мембрана

Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя представлена на рис. 10.10, а. Преобразователь представляет собой трансформатор, содержащий обмотку возбуждения 1 и вторичную обмотку 2. Вторичная обмотка состоит из двух включенных встречно полуобмоток 3, 4. Внутри катушки, на которой намотаны первичная и вторичные полуобмотки, перемещается ферромагнитный сердечник 5, соединенный с мембраной 6, на которую воздействует измеряемое давление. Обмотка возбуждения 1 создает магнитные потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ , пронизывающие вторичные полуобмотки 3, 4 и наводящие  $e_1$ ,  $e_2$  в соответствии с выражением

$$e_1 = 2\pi f I_B M_1; \quad e_2 = 2\pi f I_B M_2,$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  — взаимные индуктивности, связывающие обмотку возбуждения с соответствующими вторичными полуобмотками;  $f$ ,  $I_B$  — частота и ток возбуждения.

В среднем положении сердечника  $M_1 = M_2$ ,  $\Phi_1 = \Phi_2$ , они создают во вторичных полуобмотках равные и встречно направленные ЭДС, при этом  $E = e_1 - e_2 = 0$ , рис. 10.10, б. При смещении сердечника 5 в верхнюю половину катушки  $\Phi_1$  возрастает, а  $\Phi_2$  — уменьшается, тогда  $e_1 > e_2$  и  $E = e_1 - e_2 \neq 0$ . По мере увеличения давления растет

смещение чувствительного элемента  $x$  и амплитуда выходного сигнала преобразователя. При переходе сердечника из верхнего положения в нижнее  $e_2 > e_1$ , фаза выходного сигнала меняется на  $180^\circ$ . Для коррекции крутизны статической характеристики преобразователя и обеспечения взаимозаменяемости используется переменный резистор  $R_1$ . Таким образом, напряжение  $u_{\text{вых}}$  является однозначной функцией взаимных индукций  $M_1$ ,  $M_2$ , положения сердечника 5 и измеряемого давления.

Для измерения сигнала первичного преобразователя  $u_{\text{вых}}$  используется компенсационный метод измерения, упрощенная схема дифференциально-трансформаторной системы дистанционного измерения давления представлена на рис. 10.11. Система включает первичный 1 и вторичный 2 приборы. Последний содержит дифференциально-трансформаторный преобразователь 4, аналогичный преобразователю 3 первичного прибора, усилитель У, к выходу которого подключен реверсивный двигатель РД, соединенный с показывающей стрелкой и через кулачок 5 с сердечником 6 преобразователя 4. Вторичные обмотки дифференциально-трансформаторных преобразователей 3, 4 последовательно подключены к входу электронного уси-

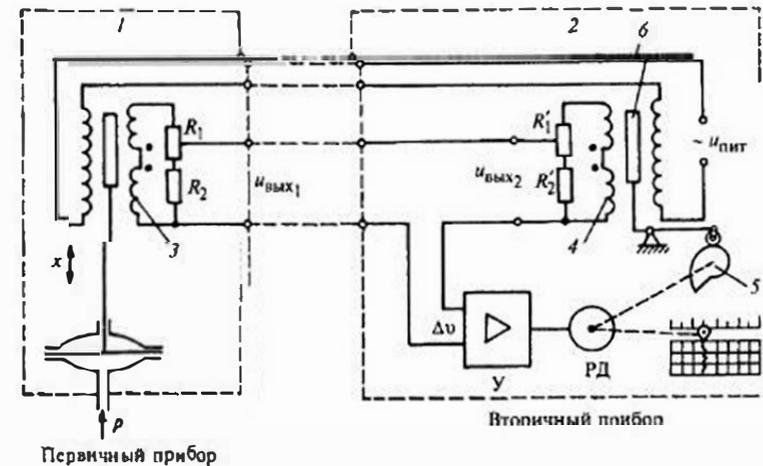


Рис. 10.11. Схема дифференциально-трансформаторной измерительной системы:

1, 2 — первичный и вторичный приборы; 3, 4 — дифференциально-трансформаторные преобразователи первичного и вторичного приборов; 5 — кулачок; 6 — сердечник

лителя,  $\Delta u = u_{\text{вых1}} - u_{\text{вых2}}$ . Обмотки возбуждения обоих усилителей включены последовательно и питаются напряжением от обмотки силового трансформатора вторичного прибора. Питание обмоток возбуждения одним током является необходимым условием работы этой системы, позволяющим устранить как влияние нелинейных искажений, имеющих место в цепях переменного тока, так и колебаний тока возбуждения. Последние в равной мере сказываются на сигналах  $e_1, e_2$ , не вызывая нарушений баланса системы.

Показания вторичного прибора снимаются в режиме компенсации измерительной системы, когда сигнал на входе усилителя равен нулю и реверсивный двигатель не вращается. В этом случае  $\Delta u = 0$ ,  $u_{\text{вых1}} = u_{\text{вых2}}$ , и ток в линиях связи вторичных обмоток обоих преобразователей равен нулю. Такой метод измерения исключает прямое влияние сопротивлений линий связи как в измерительной цепи, так и в цепи тока возбуждения на показания прибора. При значительном увеличении сопротивления линий снижается чувствительность вторичного прибора и растут погрешности. У приборов КСД класс точности равен 1, если они работают с дифманометрами-расходомерами, то линейная шкала по расходу получается за счет профилирования кулачка 5. Во вторичных приборах, отградуированных в единицах расхода, часто устанавливаются счетчики, по показаниям которых определяется суммарный расход за фиксированный интервал времени. Так, если при максимальном расходе, соответствующем верхнему пределу измерения, изменения показаний счетчика за час составляют 1000 делений, то при расходе 40% они составят 400 делений. При работе интегратора в течение 6 мин эти изменения должны составить соответственно 100 и 40 делений.

Схема трубчато-пружинного манометра МЭД с дифференциально-трансформаторным преобразователем 1 представлена на рис. 10.12. Существуют модификации манометров МЭД с отсчетным устройством, класс точности обеих модификаций 1, верхние пределы измерения от 0,1 до 160 МПа по стандартному ряду. На базе манометров МЭД выпускаются манометры МП, имеющие на выходе унифицированный токовый сигнал. Для его получения в прибор введен усилитель, преобразующий изменения взаимной индуктивности в пропорциональный токовый сигнал.

Схема дифманометра типа ДМ, имеющего встроенный дифференциально-трансформаторный преобразователь 1, представлена на рис. 10.13. Чувствительным элементом служит мембранный блок, верхняя мембранная коробка 2 которого находится в минусовой камере, куда поступает меньшее из измеряемых давлений. Нижняя

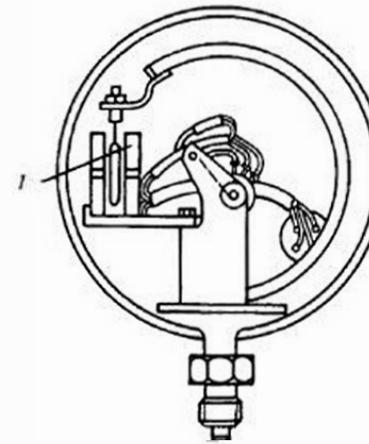


Рис. 10.12. Схема манометра МЭД с дифференциально-трансформаторным преобразователем:

1 — преобразователь

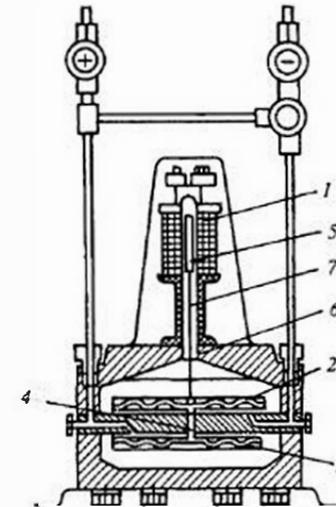


Рис. 10.13. Схема мембранного дифманометра типа ДМ:

1 — преобразователь; 2, 3 — верхняя и нижняя мембранные коробки; 4 — трубка; 5 — сердечник; 6 — разделительная трубка; 7 — стержень

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 рабочим 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. Дифманометры ДМ имеют в соответствии со

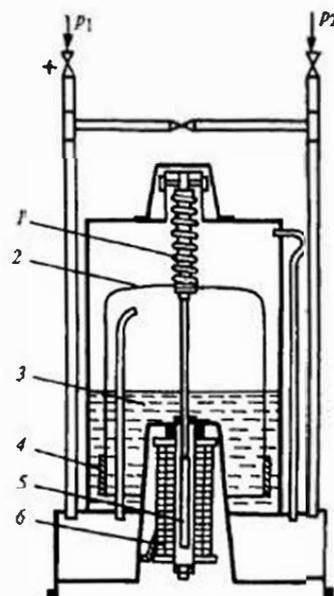


Рис. 10.14. Схема колокольного дифманометра типа ДК:

1 — пружина; 2 — колокол; 3 — разделительная жидкость; 4 — кольцо; 5 — сердечник; 6 — преобразователь

из измеряемых давлений под колокол он всплывает, при этом баланс действующих на колокол сил определяется уравнением

$$G_k - (p_1 - p_2)F_k = kx, \quad (10.9)$$

где  $G_k$ ,  $F_k$  — сила тяжести колокола и площадь его дна;  $k$ ,  $x$  — жесткость пружины и ее растяжение.

Согласно (10.9), перемещение  $\Delta x$  сердечника 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя 6, связанного с дном колокола, линейно зависит от действующей разности давлений. Колокольные дифманометры ДК имеют пределы измерения от 0,2 до 1 кПа при классе точности 1,5.

#### Преобразователи с компенсацией магнитных потоков

Преобразователи давления с компенсацией магнитных потоков имеют на выходе унифицированный токовый сигнал 0...5 мА и работают с вторичными приборами КСУ, РП-160 и др. (см. п. 7.1.1).

стандартным рядом верхние пределы измерения от 1,6 кПа до 0,63 МПа при рабочем давлении 6,3; 25 и 63 МПа, класс точности дифманометров 1; 1,5.

Особое место среди приборов давления занимают колокольные дифманометры (рис. 10.14). 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 и внутри колокола не влияет на действующую на него выталкивающую силу. При отсутствии разности давлений колокол находится в крайнем нижнем положении, уровни разделительной жидкости вне колокола и под ним совпадают. При подаче большего

В преобразователях этого типа используются разнообразные чувствительные элементы: одновитковые трубчатые пружины (МПЭ, ВПЭ, МВПЭ), сильфоны (МСЭТ, МСЭН, МСЭТН, ДСЭР), мембраны и мембранные коробки (ММЭ, МАДМЭ, ДМЭ, ДМЭР).

Схема преобразователя с компенсацией магнитных потоков представлена на рис. 10.15. Чувствительный элемент прибора соединен с постоянным магнитом 1, который перемещается между двумя индикаторными магнитопроводами 2, 3. На каждом из индикаторных магнитопроводов находятся обмотки возбуждения  $w_a$  и обратной связи  $w_{o.c}$ . Обмотки  $w_{a1}$  и  $w_{a2}$  включены последовательно с равными постоянными резисторами соответственно  $R_1$ ,  $R_2$  и питаются однополупериодным током. Индуктивные сопротивления  $L_1$ ,  $L_2$  обмоток  $w_{a1}$ ,  $w_{a2}$  зависят от состояния индикаторных магнитопроводов 2, 3. В среднем положении сердечника  $L_1 = L_2$ , токи  $I_1$ ,  $I_2$  равны и сигнал на входе усилителя  $\Delta u$  и ток на его выходе  $I$  равны нулю. При смещении постоянного магнита вверх создаваемый им поток  $\Phi_m$  рабочую точку магнитопровода 2 смещает в область насыщения,

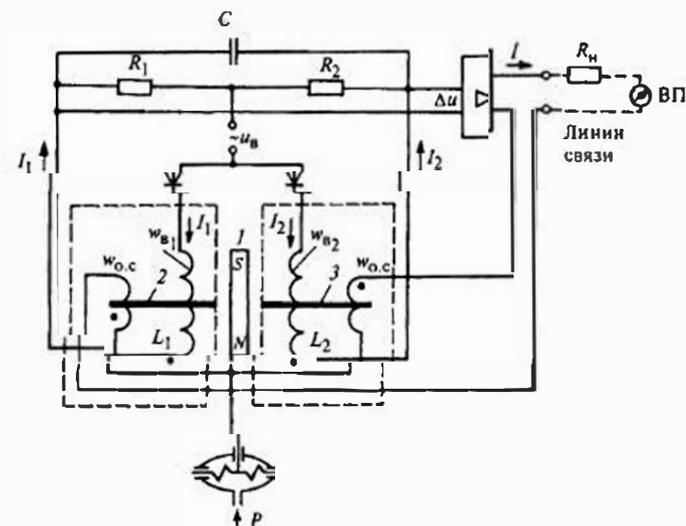


Рис. 10.15. Схема преобразователя с магнитной компенсацией: 1 — постоянный магнит; 2, 3 — два индикаторных магнитопровода

при этом  $L_1$  снижается, увеличивается ток  $I_1$ , возникает разность напряжений на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$  и на входе усилителя  $\Delta u$ .

В этих приборах используется глубокая отрицательная обратная связь. При большом коэффициенте усиления выходной ток  $I$ , протекающий через обмотку обратной связи, создает в индикаторном магнитопроводе поток  $\Phi_{oc}$ , который компенсирует магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, возвращая значения  $L_1$ ,  $L_2$  близкие к исходным значениям. Как и в любых преобразователях с глубокими отрицательными обратными связями полной компенсации потоков  $\Phi_m$  и  $\Phi_{oc}$  не происходит, незначительный небаланс  $\Delta u$ , зависящий от коэффициента усиления усилителя, остается, обуславливая пропорциональные изменения  $I$ .

На рис. 10.15 не показан усилитель обратной связи, который служит для гальванического разделения выходной цепи и цепи обратной связи. В дифманометрах-расходомерах нелинейная обратная связь обеспечивает получение токового выходного сигнала, пропорционального  $\sqrt{\Delta p}$ .

Поскольку в рассматриваемых преобразователях отрицательная обратная связь используется для компенсации магнитного поля 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 преобразования приборов.

Схема пружинного манометра с компенсацией магнитных потоков типа МПЭ-МИ представлена на рис. 10.16. Свободный конец манометрической пружины 1 связан с постоянным магнитом 2, который перемещается между двумя магнитопроводами 3. Манометры 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.

Схема сильфонного дифманометра ДСЭ-МИ с компенсацией магнитных потоков дана на рис. 10.17. Сильфон 1 служит для преобразования разности давлений, поданных вне и внутрь его, в силу, которая уравнивается силой упругого противодействия пружины 2, возникающей при ее деформации. Для получения разных диапазонов преобразования используются пружины с соответствующей жесткостью.

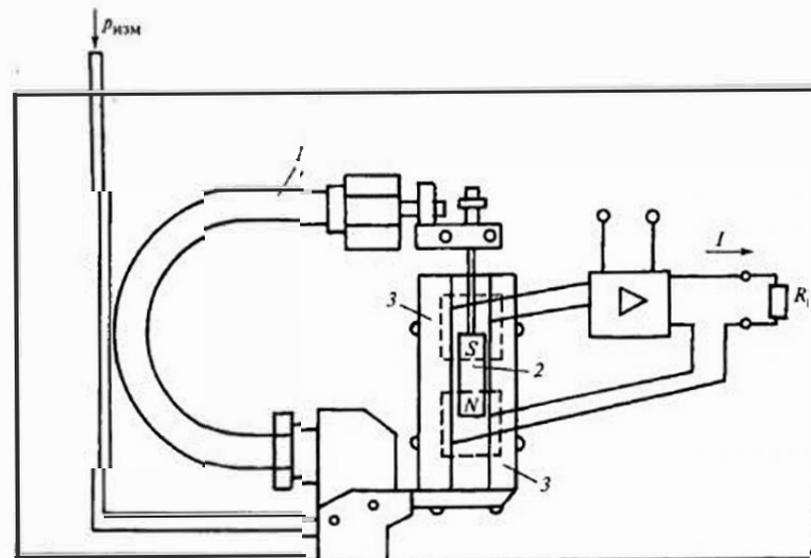


Рис. 10.16. Схема пружинного манометра МПЭ:

1 — пружина; 2 — постоянный магнит; 3 — магнитопровод

С дном 3 сильфона 1 соединен шток 4 из немагнитного материала, который заканчивается плунжером 5, представляющим постоянный магнит. Последний перемещается внутри немагнитной трубки 6, с внешней стороны которой находятся магнитопроводы 7, 8 электрического преобразователя. Помимо перепадомеров выпускаются напорометры ДСЭН-МИ, тягомеры ДСЭТ-МИ, дифманометры-расходомеры ДСЭР-МИ. При диапазонах преобразования от 1 до 4 кПа они имеют классы точности 1 и 1,5.

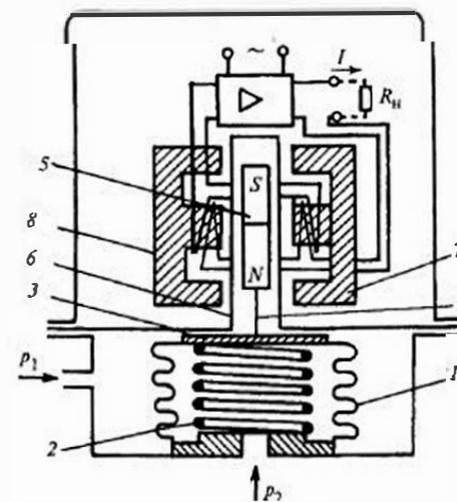


Рис. 10.17. Схема сильфонного дифманометра ДСЭ:

1 — сильфон; 2 — внутренняя пружина; 3 — дно; 4 — шток; 5 — плунжер; 6 — немагнитная трубка; 7, 8 — магнитопроводы

В мембранных дифманометрах с компенсацией маг-

нитых потоков ДМЭ-МИ и ДМЭР-МИ в качестве чувствительных элементов используются мембранные коробки, аналогичные представленным на рис. 10.13. Различие состоит в том, что плунжер в рассматриваемых приборах представляет постоянный магнит, а вне разделительной трубки находятся два магнитопровода с обмотками возбуждения и обратной связи. Дифманометры имеют верхние пределы измерения от 0,004 до 0,63 МПа, рабочее давление в зависимости от модификации до 40 МПа при классе точности 1 и 1,5.

#### Преобразователи давления с силовой компенсацией

Стабилизация статической характеристики преобразователей давления достигается за счет увеличения числа элементов, охваченных отрицательной обратной связью. Наиболее полно это реализовано

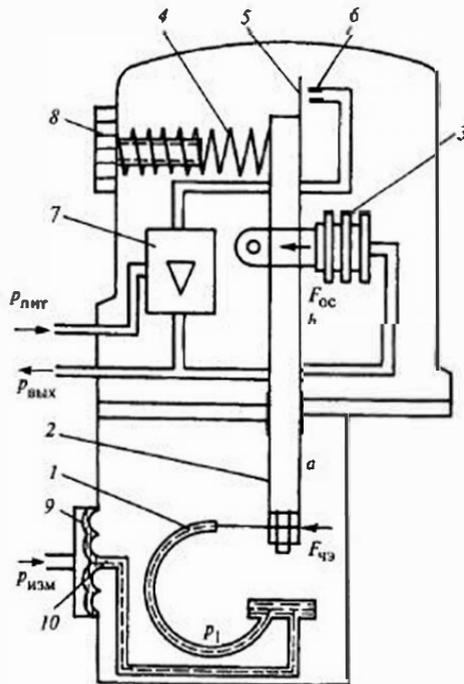


Рис. 10.18. Схема пружинного пневматического преобразователя давления 13ДИ10:

1 — манометрическая пружина; 2 — рычаг; 3 — сиффон обратной связи; 4 — пружина установки нуля; 5 — заслонка; 6 — сопло; 7 — пневмоусилитель; 8 — ручка; 9 — разделительная мембрана; 10 — кремнийорганическая жидкость

в преобразователях давления с силовой компенсацией пневматических и электрических. Схема пружинного пневматического преобразователя давления с силовой компенсацией типа 13ДИ14 представлена на рис. 10.18. В пневматических преобразователях изменения измеряемого давления соответствуют пропорциональные в пределах от 20 до 100 кПа изменения давления на его выходе. При постоянном давлении воздуха питания  $p_{пит}$  давление на выходе пневмоусилителя 7 зависит от истечения воздуха из сопла 6. Усилие  $F_{чз}$  от манометрической пружины 1, приложенное к рычагу 2, равно  $pS_{чз}$ , где  $S_{чз}$  — эффективная площадь манометрической пружины. Это усилие создает вращающий момент  $aF_{чз}$ , который уравнивается моментом силы обратной связи

$bF_{о.с} = bp_{вых}S_c$ , где  $S_c$  — площадь дна сиффона обратной связи 3. При равенстве моментов  $aF_{чз} = bF_{о.с}$ ,  $apS_{чз} = bp_{вых}S_c$ , откуда

$$p_{вых} = kp = aS_{чз}/(bS_c)p. \quad (10.10)$$

При увеличении измеряемого давления и неравенстве моментов, развиваемых манометрической пружиной и сиффоном обратной связи,  $aF_{чз} > bF_{о.с}$ , рычаг 2, соединенный с заслонкой 5 сопла 6, перемещается. Последнее приводит к снижению зазора между соплом и заслонкой, увеличению сопротивления истечению воздуха, росту давления на входе и выходе пневматического усилителя (пневмореле) 7, определяющего уравнивающее усилие обратной связи.

Уравнение (10.10) наглядно иллюстрирует преимущество рассматриваемого метода измерения. При равенстве моментов, действующих на рычаг, выходное давление пропорционально измеряемому давлению, причем коэффициент преобразования  $k$  определяется отношением постоянных величин — длин рычагов  $a$ ,  $b$  и эффективных площадей  $S_{чз}$ ,  $S_c$ . Преобразователь сопло-заслонка и пневмореле охвачены отрицательной обратной связью. При большом коэффициенте усиления пневмореле отклонения положения заслонки составляет доли миллиметра, в связи с чем упругие характеристики манометрической пружины, сиффона обратной связи, узла подвеса рычага мало влияют на коэффициент преобразования  $k$ .

В рассматриваемом приборе разделительная мембрана 9 защищает от воздействия измеряемой среды чувствительный элемент, давление к которому передается кремнийорганической жидкостью 10. Мембранные разделители используются и в других моделях этих преобразователей, имеющих сиффонные чувствительные элементы. Начальная установка положения рычага осуществляется пружиной 4, изменение натяжения которой производится ручкой 8 на крышке прибора.

Пропорциональный измеряемому давлению унифицированный выходной сигнал изменяется от 0,02 до 0,1 МПа и может передаваться по пневматическим линиям связи диаметром 6...8 мм на расстояние до 300 м. Вторичным прибором служит манометр, отградуированный в единицах измеряемого давления (см. § 7.3). Для питания пневматических преобразователей требуется подвод сжатого воздуха давлением 0,14 МПа.

Пневматические преобразователи давления с трубчатой пружиной типа 13ДИ14,40 имеют верхние пределы измерения по стандартному ряду от 10 до 100 МПа, класс точности составляет 0,6; 1.

Эти приборы входят в группу общепромышленных пневматических преобразователей давления с силовой компенсацией, к которой относятся также преобразователи абсолютных и малых давлений (напора), разрежения, вакуума и разности давлений.

Принцип силовой компенсации используется в образцовых электрических преобразователях давления типа ИПД, схема которого представлена на рис. 10.19. Поступающее в сильфон 1 давление создает усилие  $F_{чз}$ , действующее на рычаг 2. К концам последнего прикреплены катушки 3, по которым протекает выходной ток. При его взаимодействии с полем постоянных магнитов 4 возникают усилия  $F_{о.с}$ . Моменты, создаваемые рамками  $M_{о.с} = F_{о.с}b$ , суммируясь, уравновешивают момент, создаваемый  $F_{чз}$ . При неравенстве этих моментов рычаг, с которым соединен сердечник 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя 6, перемещается, вызывая изменения сигнала  $\Delta u$  на входе усилителя У, а следовательно, и на его выходе. Изменение тока  $I$  направлено в сторону устранения имеющего место небаланса моментов.

При равновесии рычага можно записать следующее соотношение:  $2F_{о.с}b = F_{чз}a$ , где  $F_{чз} = pS_{чз}$ ,  $F_{о.с} = kl$ ,  $S_{чз}$  — эффективная площадь чувствительного элемента,  $k$  — коэффициент преобразования электросилового механизма обратной связи. Из этих соотношений вытекает, что  $I = aS_{чз}/(2bk)p$ . Выходной сигнал преобразователя, изменяющийся от 0 до 1 В, снимается с образцового сопротивления  $R$  и измеряется цифровым вольтметром ЦВ. Высокая точность преоб-

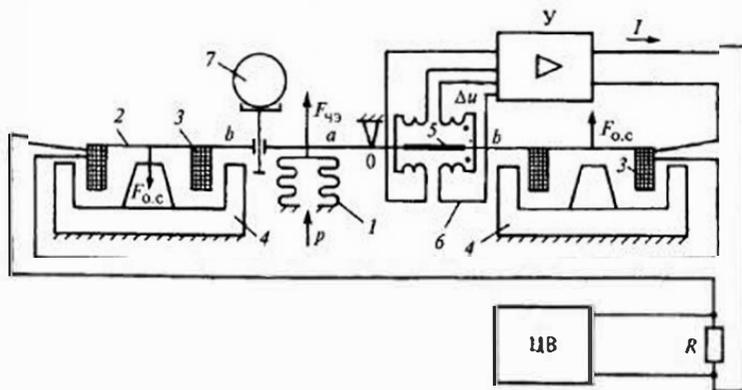


Рис. 10.19. Схема преобразователя давления типа ИПД:  
1 — сильфон; 2 — рычаг; 3 — катушки; 4 — магниты; 5 — сердечник; 6 — преобразователь; 7 — контрольная масса

разования давления в напряжение достигается благодаря постоянству величин  $a$ ,  $b$ ,  $S_{чз}$ ,  $k$ ,  $R$  и периодически выполняемой корректировке значений начального выходного сигнала и чувствительности. При регулировке последней используется контрольная масса 7, которая при входном атмосферном давлении опускается на рычаг, создавая фиксированный момент. Последнему должно соответствовать заданное значение выходного сигнала, которое указывается в паспорте и должно устанавливаться с помощью ручки «Чувствительность» при настройке прибора.

Преобразователи ИПД используются в качестве образцовых при проверке рабочих манометров, вакуумметров, напорометров, тягомеров и дифманометров, а также при выполнении высокоточных измерений в лабораторных условиях. Преобразователи имеют верхний предел измерения от  $-100$  кПа до  $19$  МПа при пределе допускаемой приведенной погрешности от  $0,06$  до  $0,25$  %, последняя погрешность относится к преобразователям с диапазоном измерения менее  $6,3$  кПа.

## 10.5. 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. 10.20. 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, 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  $C$ :  $u = Q/C$ .

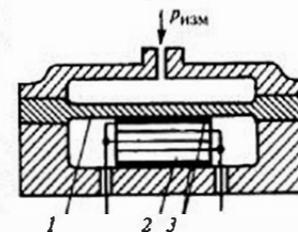


Рис. 10.20. Схема пьезоэлектрического манометра:  
1 — мембрана; 2 — кварцевые пластины; 3 — металлизированные плоскости

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 преобразователя достигает десятков килогерц, вследствие чего они применяются при испытаниях двигателей и других технических объектов, характеризующихся высокочастотными изменениями давления. Пьезоэлектрическая постоянная кварца, составляющая около  $2 \cdot 10^{-12}$  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 для измерения статических давлений. В целях повышения чувствительности несколько кварцевых пластин включаются параллельно. Верхний предел измерения давления у этих приборов достигает 100 МПа (1000 кгс/см<sup>2</sup>).

**Манометры с тензопреобразователями** по быстрдействию приближаются к пьезоэлектрическим манометрам. Их чувствительные элементы (сенсоры) представляют собой мембраны, на которых размещены проволочные, фольговые или полупроводниковые резисторы, сопротивление которых меняется при деформации мембраны под действием давления. Проволочные тензорезисторы проще в изготовлении, но их коэффициент тензочувствительности, определяемый отношением относительных изменений сопротивления к деформации, на порядок меньше, чем у полупроводниковых. В западной литературе тензопреобразователи давления обычно называют пьезопреобразователями, поскольку на греческом языке *piezo* означает давлению.

В настоящее время в РФ выпускаются преобразователи давления на базе КНС — структуры (кремний на сапфире). В преобразователях давления фирмы Siemens используется КНК-структура (кремний на кремнии). Характерным представителем преобразователей с КНС-структурой является «Сапфир-22», разработанный НИИ Теплоприбором, его модификации в аналоговом и микропроцессорном вариантах в настоящее время выпускаются многими заводами РФ. В этих приборах для преобразования силового воздействия давления в электрический 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. 10.21, а. Чувствительным элементом манометра является *тензопреобразователь 1* с двухслойной мембраной. Измеряемое давление действует на титановую мембрану, к которой сверху приляпана сапфировая мембрана с тензорезисторами. Элементы измерительной схемы и усилитель находятся в блоке 2.

Существуют два типа тензопреобразователей: давления (рис. 10.21, а) и силы (рис. 10.21, б). В *тензопреобразователях давления* измеряемое давление действует непосредственно на мембрану, поскольку при измерении давления в диапазоне 0,4 МПа и выше на мембране с тензопреобразователями диаметром 6...8 мм развиваются усилия, достаточные для ее деформации. В *тензопреобразователях силы* 4 нижняя металлическая мембрана имеет рычаг 3, к которому прикладывается сила, развиваемая мембранным блоком под действием давления. В преобразователях с диапазоном изме-

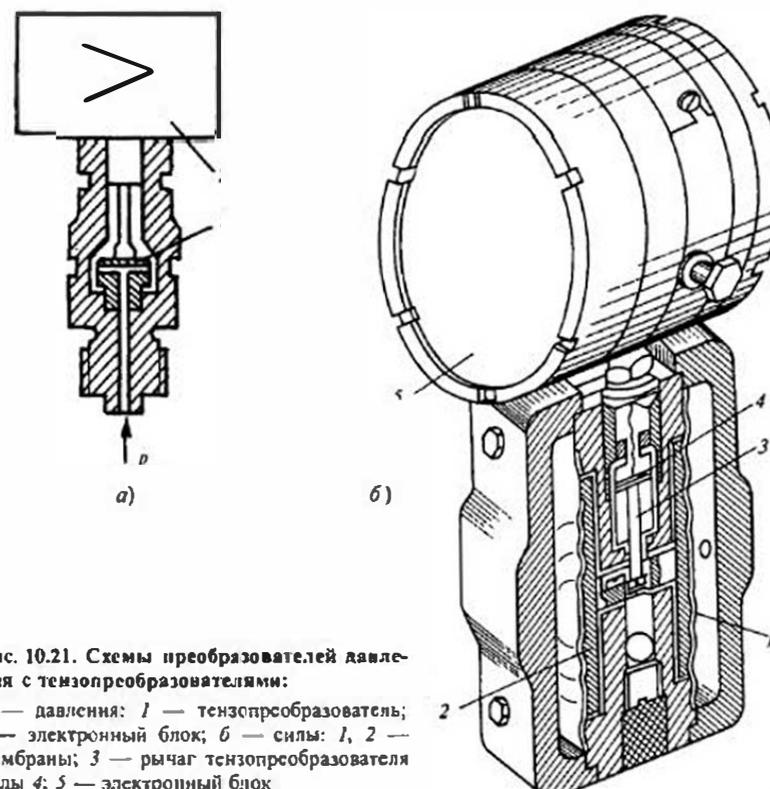


Рис. 10.21. Схемы преобразователей давления с тензопреобразователями:  
а — давления: 1 — тензопреобразователь; 2 — электронный блок; б — силы: 1, 2 — мембраны; 3 — рычаг тензопреобразователя силы; 4, 5 — электронный блок

рения менее 0,4 МПа (см. рис. 10.21, б) 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 в значительной мере определяется жесткостью мембранно-рычажного тензопреобразователя (преобразователя силы). Смещение центров мембран приводит к изгибу рычага 3 и сапфировой мембраны с тензорезисторами 4. Усилитель и элементы измерительной схемы находятся в блоке 5. Ряд давлений ниже 0,4 МПа покрывается четырьмя моделями преобразователей, имеющими четыре различных площади мембран. При минимальных пределах измерения от 0,16 до 1,6 кПа (модель 10) диаметр мембранного блока составляет 90 мм, при пределах от 25 до 250 кПа (модель 40) он равен 64 мм, при этом соотношение площадей составляет 2:1.

Принципиальная схема размещения резисторов на поверхности сапфировой мембраны представлена на рис. 10.22, а. При деформации мембраны в соответствии с эпюрой, приведенной на рис. 10.22, б, касательные напряжения  $\sigma_\tau$  имеют постоянный знак, тогда как радиальные  $\sigma_r$  его меняют. В связи с этим у размещенных радиально вблизи края мембраны тензорезисторов с ростом давления сопротивление снижается, а у размещенных касательно увеличивается. Выбирая точки размещения тензорезисторов, обеспечиваем увеличение чувствительности измерительной схемы.

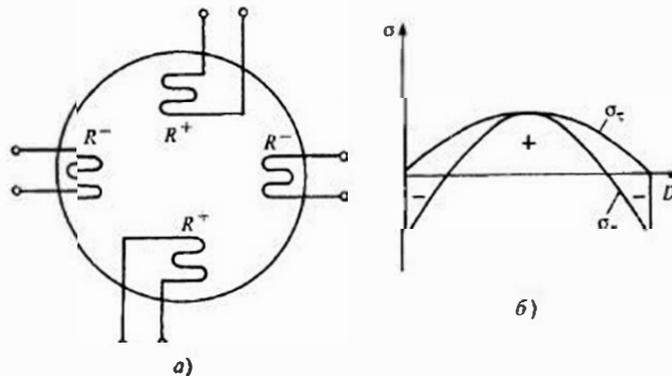


Рис. 10.22. Схема размещения тензорезисторов на поверхности мембраны (а) и эпюра напряжений (б)

Упрощенная электрическая схема аналогового преобразователя «Сапфир-22» представлена на рис. 10.23. Электронный усилитель представляет собой устройство с глубокой отрицательной обратной связью. Тензорезисторы  $R_1—R_4$  образуют неуравновешенный мост (тензоростот), сигнал небаланса которого зависит от измеряемого давления. Если плечи моста симметричны, т.е.  $R_1 = R_3 = R_0(1 + kp)$ ,  $R_2 = R_4 = R_0(1 - kp)$ , то  $R_1 + R_2 = R_3 + R_4$  и  $I_1 = I_2 = I_{TM}/2$ . При бесконечно большом входном сопротивлении усилителя  $u_{TM} = R_0(1 + kp)I_{TM}/2 - R_0(1 - kp)I_{TM}/2 = kR_0I_{TM}p$ . Ток питания тензомоста стабилизирован, постоянство коэффициента преобразования обеспечивается введением отрицательной обратной связи, снимаемой с доли  $\alpha$  резистора обратной связи  $R_{o.c}$ . Это сопротивление включено последовательно с сопротивлением нагрузки  $R_{н.}$ .

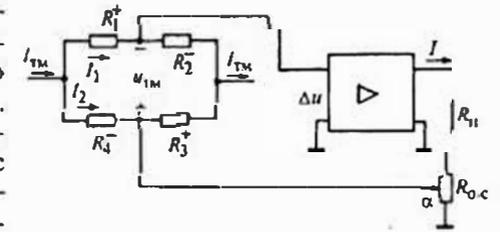


Рис. 10.23. Упрощенная электрическая схема аналогового преобразователя «Сапфир-22»

При бесконечно большом коэффициенте усиления усилителя  $\Delta u = u_{TM} - I\alpha R_{o.c} \approx 0$ , откуда  $I = kR_0I_{TM}/(\alpha R_{o.c})p$ . Изменяя  $\alpha$  и  $R_{o.c}$ , корректируем диапазон измерения прибора и меняем пределы его измерения. При одном типоразмере чувствительного элемента преобразователя за счет изменения сопротивления обратной связи имеют от 4 до 6 диапазонов измерения. Помимо корректора диапазона преобразователи имеют корректор начального значения выходного сигнала.

Недостатком преобразователей этого типа особенно низкопределных является значительный температурный коэффициент, составляющий около 0,1 %/°C. В связи с этим во всех преобразователях производится температурная компенсация, которая исходит из индивидуальных температурных характеристик каждого прибора. Для введения компенсации температурных уходов начального сигнала и диапазона в качестве терморезистора используется сопротивление диагонали питания тензомоста, которое зависит от температуры и не зависит от давления. Эта диагональ является плечом моста температурной компенсации. Пропорциональный температуре усиленный сигнал его небаланса используется как для изменения тока питания тензомоста при коррекции температурных изменений диапазона преобразователя, так и для устранения смещения его статической характеристики, вызванного температурой. В некоторых преобразователях этого типа (ф. Honeywell) для измерения температуры преобразователя применяется терморезистор, напыленный

на участок мембраны, где отсутствуют создаваемые давлением деформации.

В микропроцессорных преобразователях «Сапфир-22МП» микропроцессор используется для введения температурной компенсации, линеаризации статической характеристики измерительного блока, изменения пределов измерения.

Преобразователи «Сапфир-22» на выходе имеют токовый сигнал 0...5 мА (0...20, 4...20 мА) при сопротивлении нагрузки до 2,5 кОм (1 кОм), предел допускаемой приведенной погрешности приборов 0,25; 0,5 %, напряжение питания преобразователей 36 В. Преобразователи с выходным сигналом 4...20 мА подключаются двумя проводами. Собственное потребление усилителя не превышает 4 мА, что соответствует начальному значению измеряемого давления. 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 давления (ДГ). Пределы измерения преобразователей в соответствии со стандартными рядами находятся в границах областей, указанных на рис. 10.24.

С использованием тензопреобразователей давления большинство приборостроительных фирм мира выпускает однопредельные малогабаритные преобразователи давления. Внешний вид преобразователя КРТ, выпускаемого фирмой «Орлэкс», представлен на рис. 10.25. Преобразователи имеют на выходе токовые сигналы 0...5 и 4...20 мА, основная приведенная погрешность составляет  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1$  %. Верхние пределы измерения меняются от 0,25 до 100 МПа в соответствии со стандартным рядом. Эти преобразователи выпускаются в нескольких модификациях: в обычном исполнении, взрывозащищенные, с цифровым индикатором, с выносным усилителем, что позволяет измерять давление сред с температурой до 200 °С.

Микропроцессорные манометры с тензопреобразователями «Метран-100» и зарубежных фирм типа ST3000, SITRANS P (фирм Honeywell, Siemens и др.) помимо аналогового выходного сигнала имеют на выходе интерфейс RS-232, RS-485, Profibus, HART протоколы, что обеспечивает их работу с ПВМ и в микропроцессорных сетях.

Интеллектуальные преобразователи давления «Метран-100» помимо унифицированного токового сигнала могут иметь на выходе цифровой сигнал, соответствующий HART протоколу, рассмотренному в § 8.3. Структурная схема преобразователя «Метран-100» представлена на рис. 10.26. В измерительном блоке (сенсоре) помимо чувствительного элемента размещена плата АЦП, на которой допол-

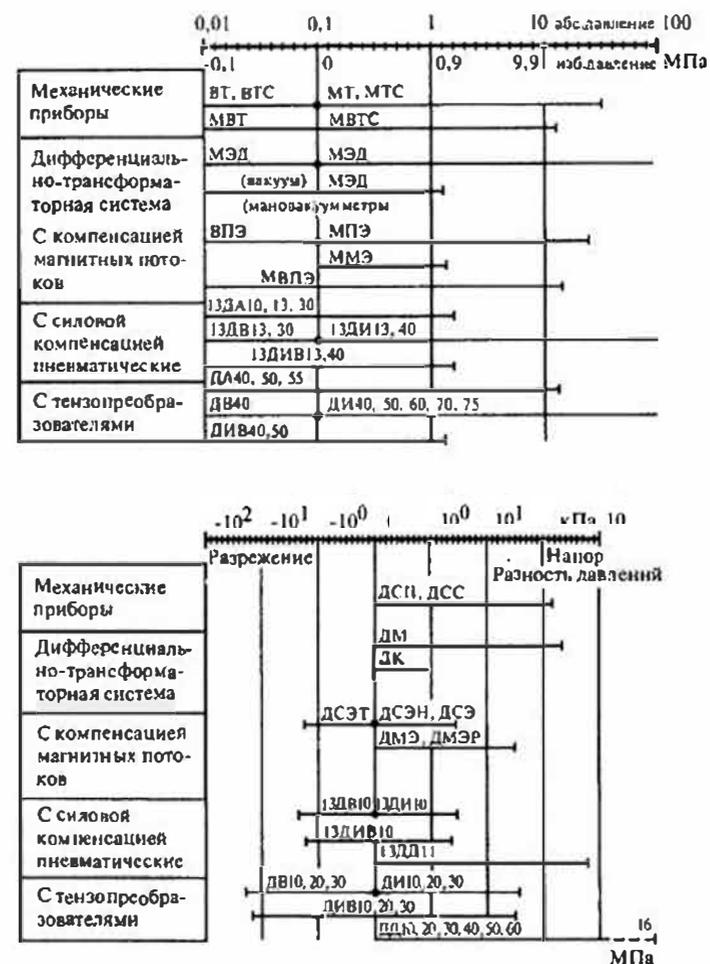


Рис. 10.24. Диапазоны измерения приборов давления основных общепромышленных групп

нительно находятся источник опорного напряжения ИОН и ПЗУ. В последнее записываются информация о измерительном блоке и коэффициенты коррекции, рассчитанные по его экспериментальным характеристикам. Такое выполнение измерительного блока обеспечивает его взаимозаменяемость и позволяет стыковать с последующим электронным блоком, который включает микропроцессор МП, ПЗУ, ЦАП, HART-модем, блок цифровой индикации ЦИ. Микропроцессор производит линеаризацию характеристики чувствительного

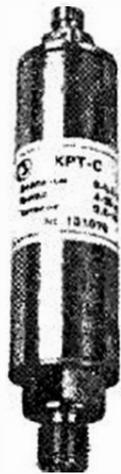


Рис. 10.25. Преобразователь давления КРТ

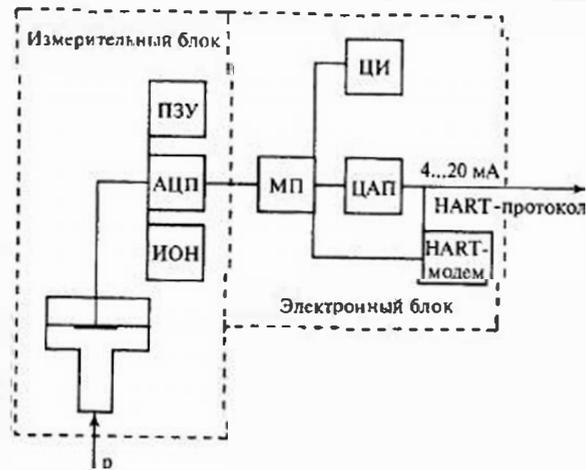


Рис. 10.26. Структурная схема микропроцессорного преобразователя давления

элемента, изменение диапазона выходного сигнала, температурную коррекцию и пр. Настройка преобразователя и изменение его конфигурации производится с ПК, подключенного через HART-модем М к цепи, или с HART коммуникатора К, изображенных на рис. 10.27. Эти устройства могут находиться на расстоянии до 3000 м от первичного преобразователя давления ПД.

Режим эксплуатации преобразователя давления, изображенный на рис. 10.27, а, является гибридным, поскольку к выходу преобразователя подключены устройства, работающие с токовым (КСУ) и цифровым (К, ПК) сигналами. Питание в цепь подается от блока

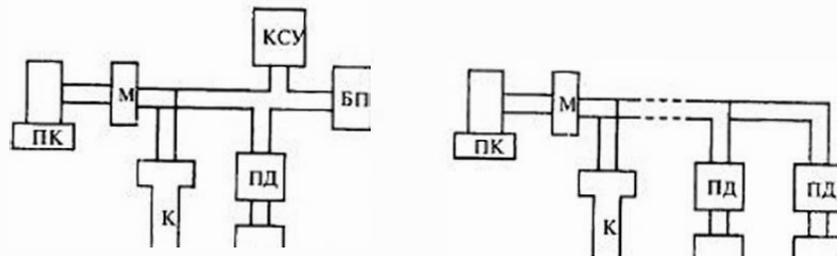


Рис. 10.27. Цепи преобразователей давления с HART-протоколом: а, б — гибридный и многоточечный режимы работы

питания (БП). При работе в цифровом многоточечном режиме, изображенном на рис. 10.27, б, преобразователь получает и передает информацию только в цифровом виде. Токковый сигнал со значением 4 мА остается постоянным и не меняется при изменении давления. К токовой петле могут подключаться до 15 преобразователей. Каждый из них работает в режиме «главный-подчиненный», являясь подчиненным и передающим информацию по запросу главного ПК (мастер) или коммуникатора. У этих преобразователей предел приведенной погрешности составляет  $\pm 0,1\%$  при возможности перенастройки диапазонов измерения до 25:1. Ряд преобразователей давления «Метран-100» имеет те же пределы измерения, что и преобразователи «Сапфир-22», приведенные на рис. 10.24.

Основное достоинство приборов давления с тензопреобразователями — использование малых деформаций чувствительных элементов, что повышает их надежность и стабильность характеристик, а также обеспечивает виброустойчивость. При осуществлении тщательной температурной компенсации предельная приведенная погрешность приборов составляет  $\pm 0,075\%$ ,  $\pm 0,1\%$ .

#### Манометры с емкостными преобразователями

Высокими метрологическими характеристиками обладают интеллектуальные манометры с емкостными преобразователями, выпускаемыми фирмами Fischer-Rosemount, Philips и др. Схема микропроцессорного преобразователя давления модели 1151 (фирма Fischer-Rosemount) представлена на рис. 10.28. Измеряемое давление или разность давлений воздействуют на разделительные мембраны 1, между которыми в полости, заполненной нейтральной жидкостью, находится чувствительная мембрана 2, являющаяся подвижной обкладкой дифференциальных конденсаторов, неподвижными обкладками которых служат стенки камер 3, 4. Эти преобразователи имеют на выходе токовый сигнал 4...20 мА, экономичный сигнал по напряже-

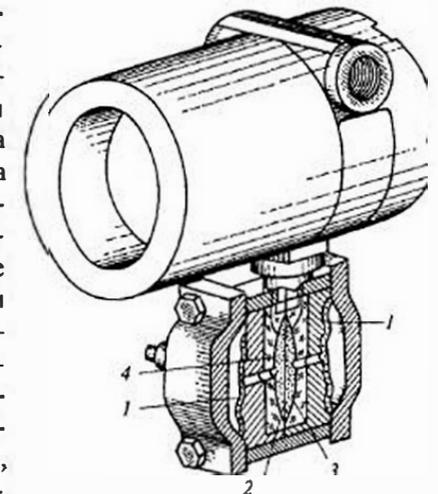


Рис. 10.28. Манометр с емкостным преобразователем: 1 — разделительные мембраны; 2 — чувствительная мембрана; 3, 4 — неподвижные обкладки конденсаторов

нию 0,8...3,2 и 1...5 В, HART-протокол. У дифманометров преобразование может быть линейным и квадратичным, прибор может иметь цифровой индикатор.

Преобразователи измеряют абсолютное давление от 6,22 до 6895 кПа, избыточное давление от 0,49 до 4136 кПа, разность давлений от 0,49 до 6895 кПа, гидростатическое давление от 6,2 до 689,5 кПа. Предел основной допускаемой приведенной погрешности составляет  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,2$ ;  $\pm 0,25$  %.

Последние разработки в области измерения давления — это интеллектуальные преобразователи EJA фирма Yokogawa. В качестве чувствительного элемента в них используется кремниевый резонатор, представляющий кристалл, частота собственных колебаний которого зависит от его растяжения или сжатия. Модели этих преобразователей охватывают весь ряд избыточных и вакуумметрических давлений от  $-0,1$  до 50 МПа, абсолютных давлений от 0 до 3 МПа, разностей давлений от 0,5 кПа до 14 МПа. Прибор может иметь цифровую индикацию, выходной сигнал 4...20 мА и HART-протокол. Предел основной допускаемой приведенной погрешности составляет  $\pm 0,075$  % при стабильности в течение 24 мес.  $\pm 0,1$  %.

Для измерения высоких давлений в диапазоне 250...1600 МПа применяются манометры сопротивления манганиновые, в которых чувствительным элементом является катушка из манганиновой проволоки. Сопротивление катушки 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.) используются ионизационные манометры. Схема прибора представлена на рис. 10.29, а. Основным элементом манометра — стеклянная манометрическая лампа, содержащая катод 1, который находится внутри анодной сетки 2,

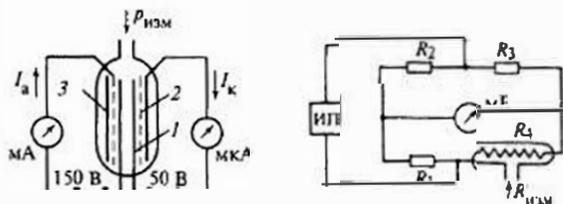


Рис. 10.29. Схемы ионизационного (а) и теплового (б) манометров: 1 — катод; 2 — анодная сетка; 3 — цилиндрический ионный коллектор

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. 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. Образцовые приборы, применяемые 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 ВИМ с манометрическим преобразователем ММ-14М.

**Тепловые манометры.** Для измерения давления в диапазоне  $1...10^4$  Па ( $10^{-2}...10^2$  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. 10.29, б. 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  $200$  °С 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 сте-

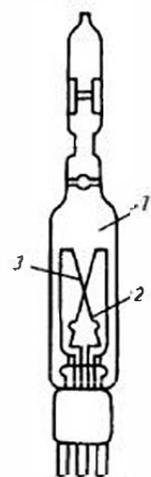


Рис. 10.30. Термопарный манометрический преобразователь:

1 — стеклянный баллон; 2 — платиновый нагреватель; 3 — хромель-копелевая термопара

нок камеры, прилежащее к  $R_4$  плечо моста помещается в вакуумированную 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 (лампы) вакуумметра типа ВТ-2 представлена на рис. 10.30. 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.

## 10.6. Грузопоршневые манометры

В грузопоршневых манометрах измеряемое давление уравновешивается силой тяжести неуплотненного поршня с грузами. Манометры используются в качестве образцовых средств для поверки приборов давления в диапазоне от  $-3$  до  $2,5 \cdot 10^4$  кПа, а также для точных измерений давления в лабораторной практике.

Схема поршневого манометра, имеющего диапазон измерения 6 МПа (МП-60), представлена на рис. 10.31. Поршень 1 с тарелкой 2 для грузов 3 перемещается внутри цилиндра 4. Поршневая пара подгоняется таким образом, чтобы зазор между поршнем и цилиндром не превышал 0,01 мм. Имея такой зазор даже при высоких давлениях скорость опускания поршня из-за утечки рабочей жидкости не превышает 1 мм/мин. Для обеспечения равномерного зазора

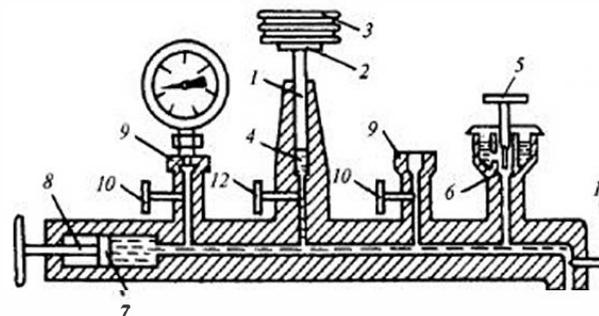


Рис. 10.31. Схема грузопоршневого манометра МП-60:

1 — поршень; 2 — тарелка; 3 — грузы; 4 — цилиндр; 5 — вентиль; 6 — резервуар; 7 — поршень винтового пресса; 8, 9 — стоки; 10-12 — запорные вентили

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 поверяемые манометры. Вентиль 11 служит для слива жидкости из поршневого манометра. Для получения заданного давления на тарелку с учетом ее массы с поршнем накладываются грузы, создающие определенную силу тяжести. При суммарной массе поршня с грузами  $M$  создаваемое давление

$$p = Mg/S, \quad (10.11)$$

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  $1 \text{ см}^2$ , 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 4 без использования грузопоршневой колонки. В этом случае вентилем 12 колонка отключается, а создаваемое давление измеряется образцовым манометром, подключенным к одному из стояков.

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, представлена на рис. 10.32. 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  $M_1g/(S_1 - S_0) = M_2g/S_2$ , где  $M_1, M_2$  — массы соответствующих поршней с тарелками.

При подаче в сосуд 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  $p_{\text{изм}} = M_1g/S_0$ . Если измеряется разрежение  $p_{\text{раз}}$ , то поршень 1 идет вниз, а поршень 2 — вверх. Для возвращения поршней в исходное положение грузы массой  $M_2$  накладываются на поршень 2, при этом

$$p_{\text{раз}}S_0 = M_2g(S_1 - S_0)/S_2; \quad p_{\text{раз}} = M_2g(S_1 - S_0)/(S_0S_2).$$

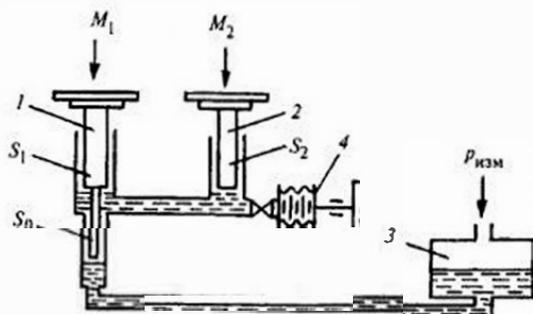


Рис. 10.32. Схема поршневой системы мановакуумметра МВП-2,5: 1, 2 — поршни; 3 — сосуд; 4 — масляный сифонный пресс

Низкая погрешность воспроизведения и измерения давления с помощью грузопоршневых манометров определяется в соответствии с (10.11) высокой точностью задания массы грузов, площади сечения поршня и ускорения свободного падения.

## 10.7. 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 показаний приборов. При этом необходимо учитывать, что наличие столба жидкости в импульсной линии создаст 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

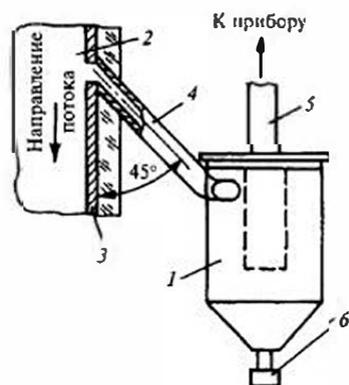


Рис. 10.33. Схема отборного устройства с циклоном:  
1 — циклон; 2 — пылепровод; 3 — металлическая стенка; 4, 5 — трубки; 6 — отверстие с пробкой

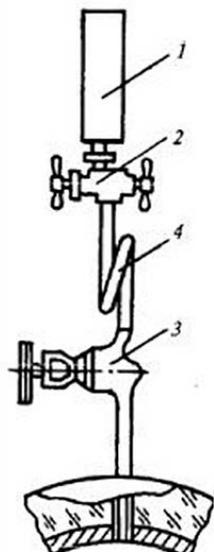


Рис. 10.34. Схема установки манометра на трубопроводе:  
1 — манометр; 2 — трехходовой кран; 3 — запорный вентиль; 4 — изогнутая кольцом трубка

быть выполнена заподлицо с внутренней стенкой, чтобы у выступающей части не создавалось торможение потока. При измерении давления 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, чтоб в импульсные линии не попадал конденсат.

При измерении напоров и разрежений в газоходах, воздуховодах, пылепроводах часто возникает необходимость сглаживания пульсаций давления и отделения взвешенных частиц. На рис. 10.33 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 циклоне взвешенные частицы сепарируются и периодически удаляются из него через отверстие 6. Для сглаживания пульсаций перед измерительным прибором устанавливаются дроссели. Длина линий от точки отбора давления до прибора должна обеспечивать охлаждение измеряемой среды до температуры окружающего воздуха. С помощью кранов переключателей один напоромер или тягомер может подключаться к нескольким точкам отбора давления или разрежения.

Схема установки манометра 1 на трубопроводе представлена на рис. 10.34. Для обеспечения возможности отклю-

чения манометра, продувки линии и подключения контрольного манометра используется трехходовой кран 2, при измерении давления свыше 10 МПа ( $100 \text{ кг/см}^2$ ), а также при контроле давления радиоактивного теплоносителя дополнительный запорный вентиль 3 устанавливается на выходе из трубопровода. При измерении давления сред с температурой выше  $70^\circ \text{C}$  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. 10.35. Агрессивная среда подается под мембрану 1, нижняя часть которой и прилегающие стенки 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. 10.36) это ограничение отсутствует. Нейтральная разделительная жидкость, заполняющая часть разделитель-

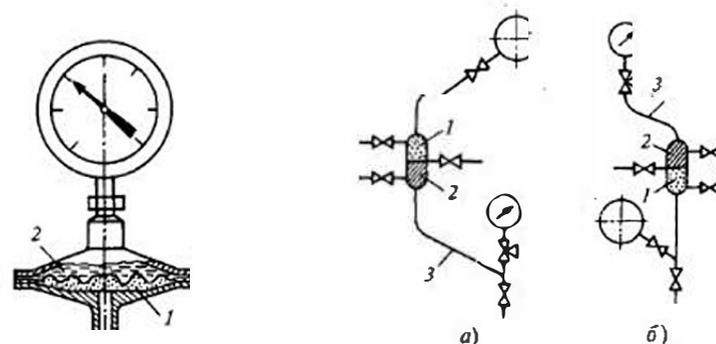


Рис. 10.35. Схема манометра с мембранным разделителем:  
1, 2 — агрессивная и нейтральная среда

Рис. 10.36. Схема установки манометров разделительными сосудами при плотности измеряемой среды меньше плотности нейтральной (а) и больше (б):  
1 — измеряемая среда; 2 — разделительный сосуд; 3 — линия, заполненная нейтральной средой

ного сосуда 2, измерительную камеру прибора и линии между ними 3, должна по плотности значительно отличаться от измеряемой среды 1 и не смешиваться с ней. На рис. 10.36, а плотность агрессивной среды меньше разделительной, а на рис. 10.36, 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 менее 5°. При измерении разности давлений воды и пара измерительные камеры дифманометров предварительно должны быть заполнены водой.

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.

### Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия жидкостных манометров?
2. Какие существуют способы повышения точности жидкостных манометров?
3. Какие разновидности упругих чувствительных элементов вы знаете?
4. Манометры с какими упругими чувствительными элементами вы выберете, если необходимо измерить давление в пределах: 0...1 кПа; 0...0,1 МПа; 0...100 МПа?
5. Какое влияние на показания оказывает сопротивление линий связи между первичным и вторичным приборами дифференциально-трансформаторной системы?
6. Каковы причины широкого использования в качестве выходного сигнала преобразователей токового унифицированного сигнала?
7. Какими методами обеспечивается высокая точность преобразователей с силовой компенсацией типа ИПД?
8. Каково назначение вентильного блока дифманометров?

9. Какие вы знаете типы тензопреобразователей и каков их принцип действия?
10. Благодаря чему в преобразователях с токовым выходным сигналом изменение сопротивления нагрузки не влияет на выходной сигнал?
11. Что ограничивает нижний предел применения нонизационных манометров?
12. Что определяет высокую точность грузопоршневых манометров?
13. Какие устройства используются для защиты манометров от действия высоких температур и агрессивных сред?

## Глава одиннадцатая ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

Измерение уровня жидкостей и сыпучих тел играет важную роль при автоматизации технологических процессов, особенно если поддержание уровня связано с условиями безопасной работы оборудования. Уровнемеры широко используются в пищевой, нефтяной и нефтеперерабатывающей промышленности, при производстве медикаментов и пищевых продуктов. Уровнемеры применяются либо для контроля за отклонением уровня от номинального и в этом случае они имеют двустороннюю шкалу, либо для определения количества вещества (в сочетании с известными размерами емкости) и в этом случае они имеют одностороннюю шкалу. Большую группу составляют сигнализаторы уровня, в которых выходной сигнал возникает при достижении уровнем верхнего или нижнего предельных значений.

В зависимости от условий измерения, характера контролируемой среды используются различные методы измерения уровня. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, то уровень жидкости можно измерять уровнемерами с визуальным отсчетом (указательные стекла). При необходимости дистанционного измерения уровня применяются более сложные уровнемеры: гидростатические (дифманометрические и барботажные), буйковые и поплавковые, емкостные, индуктивные, радиоизотопные, волновые, акустические, термокондуктометрические. Разнообразие принципов действия и конструктивных исполнений уровнемеров обусловлено их использованием для измерения уровня воды, растворов и суспензий, нефтепродуктов, границ раздела сред, содержащих взвеси, сыпучих тел в различных отраслях народного хозяйства.

Все упомянутые фирмы, производящие средства контроля и автоматизации, выпускают и уровнемеры. Так, фирма Siemens выпускает четыре типа сигнализаторов уровня: ультразвуковые ULS, емкостные CLS, с вращающимися лопастями PLS и вибрационные VLS, предназначенные для сигнализации уровня жидких и сыпучих сред, границ их раздела. Кроме того, эта фирма выпускает ультразвуковые, радарные, емкостные и гидростатические уровнемеры. Существуют приборостроительные фирмы, в основном специализирую-

щиеся на выпуске различных типов уровнемеров: НПП «Сенсор», ЗАО «Альбатрос», фирма VEGA, фирма VALCOM и др. Некоторые разновидности наиболее распространенных уровнемеров рассматриваются ниже.

### 11.1. 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), сообщаемой с жидкостным и газовым пространствами контролируемого резервуара (рис. 11.1). 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.

Основным источником дополнительной погрешности таких уровнемеров является разница плотностей жидкости в контролируемом резервуаре и в стекле, вызываемая различием температур (особенно если жидкость в резервуаре имеет высокую температуру, а указательное стекло находится на значительном удалении). Различие плотностей приводит к различию уровней в резервуаре  $h_1$  и указательном стекле  $h_2$  (уровень в стекле иногда называют «весовым» уровнем); при этом абсолютная погрешность измерения может быть вычислена по формуле

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 \left( 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности жидкости в резервуаре и указательном стекле.

Погрешность может достигать существенных значений, поэтому в целях ее уменьшения необходима либо тепловая изоляция уровнемера, либо продувка его жидкостью из резервуара перед отсчетом.

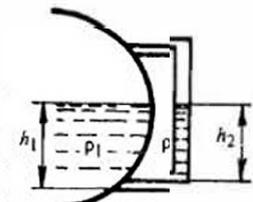


Рис. 11.1. Схема уровнемера с визуальным отсчетом

## 11.2. Гидростатические уровнемеры

В этих уровнемерах измерение уровня  $H$  жидкости постоянной плотности  $\rho$  сводится к измерению гидростатического давления  $P$ , создаваемого жидкостью, причем

$$P = H\rho g. \quad (11.1)$$

Измерение высоты уровня непосредственно по величине гидростатического давления можно производить в резервуарах, находящихся как под атмосферным, так и под отличающимся от него давлением. На рис. 11.2, а представлена схема зонда серии MPS фирмы Siemens. Зонд представляет собой трубку 1, внутренняя полость которой сообщается с жидкостью. Таким образом, давление внутри трубки совпадает с давлением жидкости. В нижней части трубки 1 находится измерительная мембрана из нержавеющей стали. Ее деформация вызывает изменение сопротивления тензоэлемента. Измерительная мембрана, тензопреобразователь и электроника защищены от измеряемой среды колпаком 2. Вентиляционная трубка соединена с пространством под измерительной мембраной и атмо-

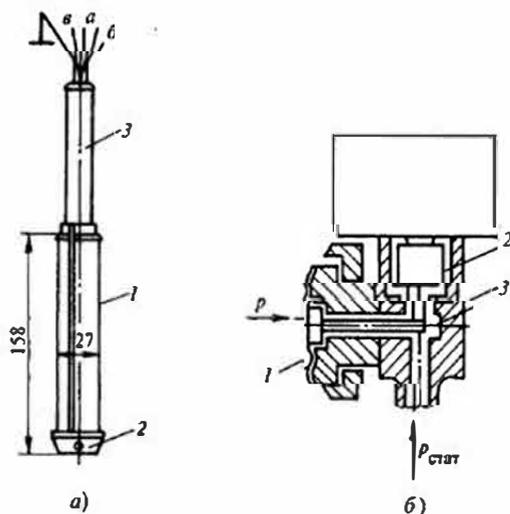


Рис. 11.2. Схемы гидростатических уровнемеров:

а — погружного зонда: 1 — трубка; 2 — колпак; 3 — мягкая трубка; б — дифманометра с открытой мембраной: 1 — мембрана; 2 — тензопреобразователь; 3 — полость статического давления

сферой. Мягкая трубка 3 может иметь длину до 20 м, в ней размещены несущий тросик а, экранированные токовые выводы б, вентиляционная трубка в диаметром 1 мм. Зонд выдерживает перегрузку до 0,6 МПа, выходной сигнал составляет 4...20 мА, погрешность не превышает  $\pm 0,3\%$ .

Практически все фирмы, выпускающие рассмотренные в гл. 10 тензометрические (пьезометрические) преобразователи разности давлений, производят дифманометры-уровнемеры с открытой мембраной, например «Метран-43-ДГ», «Метран-43Ф-ДГ», рис. 11.2, б. Вес столба жидкости действует на мембрану 1, жесткий центр мембраны соединен с рычагом мембранно-рычажного тензопреобразователя (преобразователя силы) 2. Если резервуар находится под давлением, то газовая часть резервуара соединяется с полостью статического давления 3. У упомянутых преобразователей при верхнем пределе измерения от 4 до 250 кПа выходной сигнал составляет 0...5; 4...20 мА, а предел допускаемой приведенной погрешности равен  $\pm 0,25; \pm 0,5\%$ .

Если в трубке, соединяющей газовое пространство над жидкостью с полостью статического давления преобразователя, образуется конденсат, то для измерения уровня используются дифманометры с дополнительными устройствами для стабилизации уровня конденсата. Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости измеряется дифманометром, называется дифманометрическим. Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости преобразуется в давление воздуха, называется пневмоуровнемером. Разновидностью пневмоуровнемера является барботажный уровнемер, в котором воздух, подаваемый от постороннего источника, барботирует через слой жидкости.

**Дифманометрические уровнемеры.** Схема подключения дифманометра к открытому резервуару, находящемуся под атмосферным давлением, изображена на рис. 11.3. Обе импульсные трубки дифманометра 2 заполняются контролируемой жидкостью (если она не агрессивна). Дифманометр измеряет разность давле-

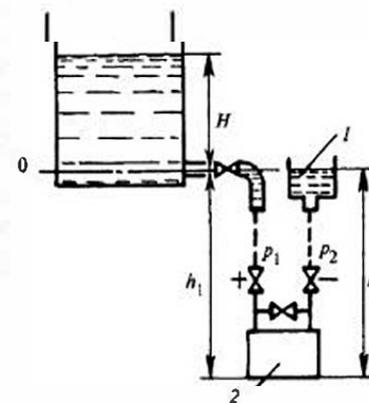


Рис. 11.3. Схема подключения дифманометра при измерении уровня в открытом резервуаре:

1 — уравнительный сосуд; 2 — дифманометр

ний  $p_1$  и  $p_2$ , действующих на его чувствительный элемент. В соответствии с (11.1) 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  $H$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (H + h_1)\rho_1 g - h_2 \rho_2 g. \quad (11.2)$$

Если плотности  $\rho_1$  и  $\rho_2$  жидкости в обеих импульсных трубках одинаковы и если  $h_1 = h_2$ , то

$$\Delta p = H \rho g, \quad (11.3)$$

где  $\rho = \rho_1 = \rho_2$ .

Из (11.2) и (11.3) видно, что дифманометрический уровнемер измеряет «весовой» уровень, т.е. его показания будут изменяться при изменении плотности контролируемой среды. Погрешность в показаниях также появится, если имеется разность плотностей  $\rho_1$  и  $\rho_2$  в импульсных трубках (для исключения этой погрешности импульсные трубки прокладываются рядом). Наконец, формула (11.3) справедлива только в том случае, если уровень жидкости в «минусовой» импульсной трубке (обозначенной знаком «-») будет неизменным при изменении контролируемого уровня  $H$ . Для чего на этой импульсной трубке устанавливается уравнительный сосуд 1. Сосуд и импульсная трубка заливаются жидкостью до уровня 00,

принятого за начальную отметку шкалы уровнемера. Необходимость установки уравнительного сосуда легко пояснить с помощью рис. 11.4. Предположим, что при  $H = 0$  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  $\Delta p = h_1 \rho g$ , т.е. диапазон измерения дифманометра будет использован не полностью).

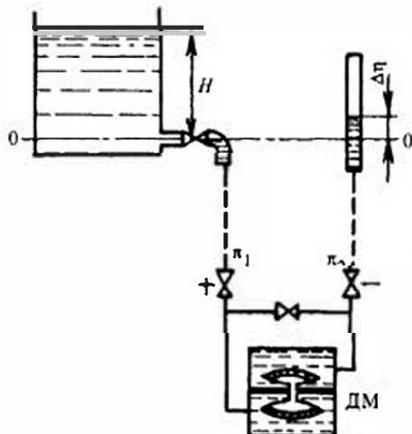


Рис. 11.4. Схема образования погрешности при отсутствии уравнительного сосуда

При увеличении  $H$  будет расти давление  $p_1$  в плюсовой (нижней) камере дифманометра, что вызовет сжатие плюсовой (нижней на рис. 11.4) мембранной коробки. В соответствии с принципом действия дифманометра это приведет к расширению и увеличению объема мембранной коробки в минусовой (верхней на рис. 11.4) камере (изменение объема коробок на рис. 11.4 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  $\Delta p' < \Delta p$  (11.3), 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 объем жидкости, вытолкнутой из минусовой камеры дифманометра, в широком сосуде вызовет меньшее изменение уровня, чем в тонкой импульсной трубке.

При большой высоте уровня жидкости иногда уравнительные сосуды не устанавливаются вообще, так как в этом случае относительная погрешность  $\Delta h/H$  незначительна (например, в баках химочищенной воды).

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. 11.5 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, что обеспечивает постоянство уровня за счет стока излишков конденсата в барабан. Трубка 3 непосредственно подключается к водяному пространству барабана. Выражение для разности давлений  $\Delta p$ , изме-

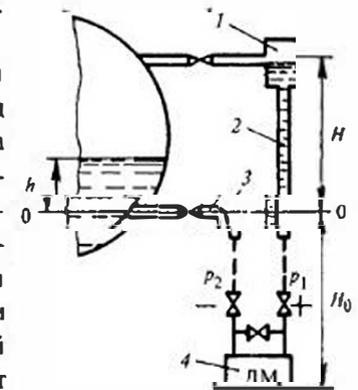


Рис. 11.5. Схема уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом:

1 — уравнительный сосуд; 2, 3 — импульсные трубки; 4 — дифманометр

ряемой дифманометром 4, может быть легко получено через давления, создаваемые в плюсовой  $p_1$  и минусовой  $p_2$  камерах дифманометра:

$$p_1 = (H + H_0)\rho_w g + p_6,$$

где  $\rho_w$  — плотность воды в уравнительном сосуде и импульсной трубке 2;  $p_6$  — давление в барабане.

Давление  $p_2$  представляет собой  $p_6$  и сумму гидростатических давлений столба жидкости  $h$  в барабане, имеющего плотность  $\rho'$ , столба жидкости  $H_0$  в импульсной трубке 3 плотностью  $\rho_w$  и столба пара в барабане высотой  $H - h$  и плотностью  $\rho''$ :

$$p_2 = H_0\rho_w g + h\rho'g + (H - h)\rho''g + p_6.$$

Таким образом, перепад  $\Delta p$ , действующий на дифманометр, определяется выражением:

$$\begin{aligned} \Delta p = p_1 - p_2 &= [H\rho_w - h\rho' - (H - h)\rho'']g = \\ &= [H(\rho_w - \rho'') - h(\rho' - \rho'')]g. \end{aligned} \quad (11.4)$$

Из (11.4) легко заметить, что показания уровнемера зависят не только от текущего значения, 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 оказывает влияние изменения плотности воды  $\rho_w$  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.

Графики, иллюстрирующие изменение показаний уровнемера при отклонении давления пара в барабане от расчетного значения 16 МПа при температуре воды в трубке 2 (см. рис. 11.5) равной 20 °С, представлены на рис. 11.6.

Уровнемер измеряет отклонение уровня в барабане от номинального в интервале  $\pm 315$  мм, следовательно, номинальный уровень на рис. 11.6 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 отклонения параметров уровнемер

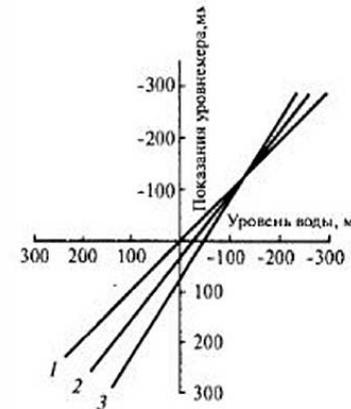


Рис. 11.6. Графики изменения показаний уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане:

1—3 —  $p = 16$  МПа; 10; 4

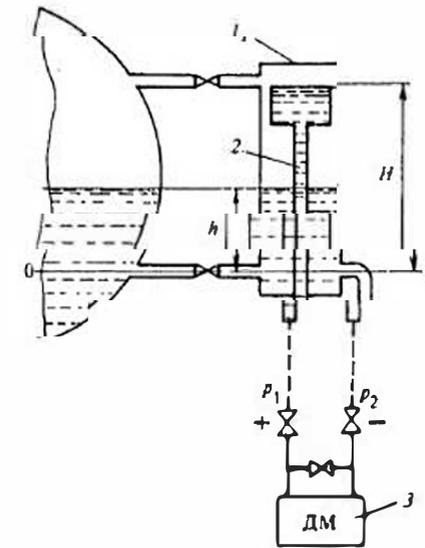


Рис. 11.7. Схема уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом:

1 — сосуд; 2 — внутренняя трубка; 3 — дифманометр

будет испытывать при уровне, соответствующем точке пересечения линий, но этот уровень ниже номинального.

Очевидно, что отклонение температуры окружающей среды от расчетной (20 °С) вызывает изменение  $\rho_w$  и показаний уровнемера. Уменьшение влияния изменения  $\rho_w$  на показания уровнемера может быть достигнуто использованием *двухкамерного уравнительного сосуда* (рис. 11.7). Внешняя поверхность сосуда 1 покрыта тепловой изоляцией, для того чтобы плотность воды в нем и во внутренней трубке 2 была равна плотности воды в барабане. Для такой схемы выражение для перепада давления, действующего на дифманометр 3, имеет вид

$$\Delta p = H\rho'g - [h\rho'g + (H - h)\rho''g] = (H - h)(\rho' - \rho'')g, \quad (11.5)$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  — плотности воды и пара в барабане.

Таким образом, и при использовании такой схемы показания уровнемера зависят от разности плотностей воды и пара  $\rho' - \rho''$ , которая определяется режимом работы установки.

Графики, характеризующие изменение показаний такого уровнемера при отклонении давления в барабане от расчетного давления 10 до 4 и 6 МПа, представлены на рис. 11.8. Погрешность уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом, как и с однокамерным, зависит от текущего значения уровня. При определенном его значении, соответствующем точке пересечения линий на рис. 11.8, изменения давления не сказываются на показаниях уровнемера. Это значение уровня больше номинального (для схемы рис. 11.6 оно было меньше 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. 11.6 и 11.8). Для такого уровнемера линии, характеризующие зависимость показаний от уровня при различных давлениях (линии на рис. 11.6 и 11.8), должны пересекаться в начале координат.

Такие характеристики имеют уровнемеры с комбинированными уравнительными сосудами (рис. 11.9).

Этот сосуд отличается от двухкамерного сосуда тем, что импульсная трубка 2 от уравнительного сосуда 1 проходит не через весь сосуд 3, а выведена сбоку. Таким образом, столб воды высотой  $h_1$

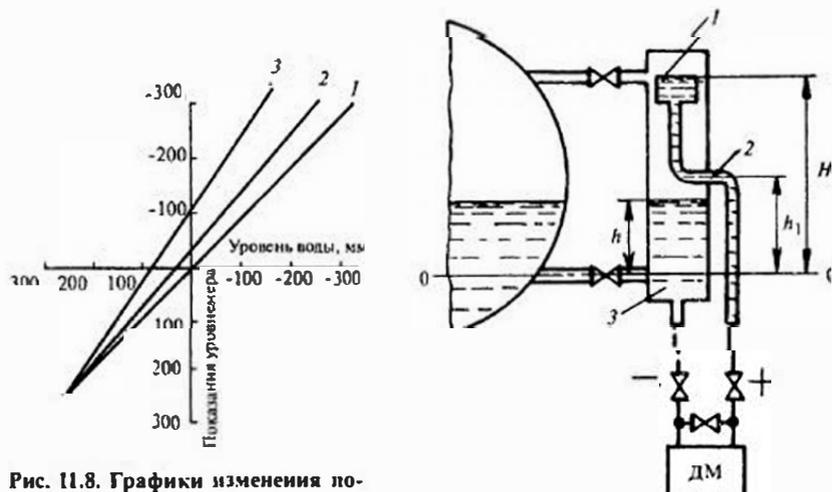


Рис. 11.8. Графики изменения показаний уровнемера с двухкамерным измерительным сосудом при изменении давления в барабане котла:

1—3 —  $p = 10$  МПа; 6; 4

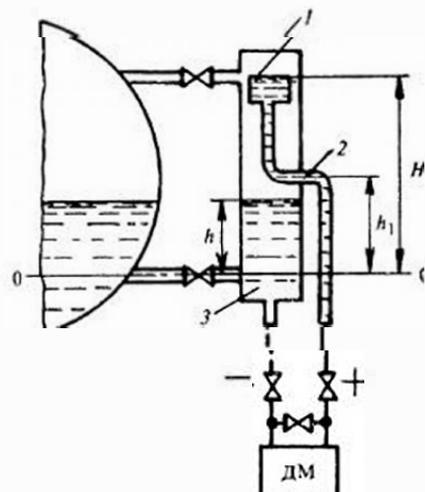


Рис. 11.9. Схема уровнемера с комбинированным уравнительным сосудом:

1 — уравнительный сосуд; 2 — импульсная трубка; 3 — сосуд

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

$$\begin{aligned} \Delta p &= [(H - h_1)\rho' + h_1\rho_B]g - [h\rho' + (H - h)\rho'']g = \\ &= [(H - h)(\rho' - \rho'') + h_1(\rho_B - \rho')]g, \end{aligned} \quad (11.6)$$

где  $\rho_B$  — плотность воды в трубке 2 на участке  $h_1$ .

Из (11.6) видно, что на зависимость  $\Delta p = f(H)$  влияет значение  $h_1$ .

Рекомендуется выбирать из соотношения

$$h_1 = 1,222(H - h_{\text{ср}}),$$

где  $h_{\text{ср}}$  — номинальный уровень в барабане относительно нулевой линии 00 (см. рис. 11.9).

Графики зависимости показаний уровнемера с комбинированным уравнительным сосудом от значений уровня при расчетном давлении в барабане 16 МПа и при давлении 10 и 4 МПа приведены на рис. 11.10. Как следует из графиков, минимальное влияние изменения давления оказывает практически при номинальном уровне.

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 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. В микропроцессорных уровнемерах коррекция показаний производится по результатам независимого измерения давления в барабане котла и температуры конденсата в линии.

Все рассмотренные схемы подключения дифманометров-уровнемеров могут использоваться для измерения

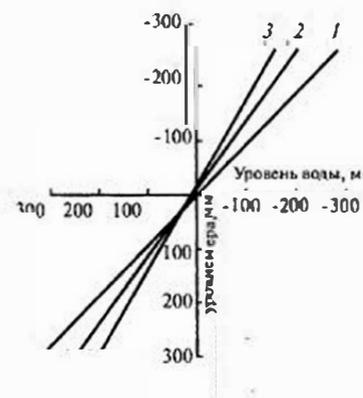


Рис. 11.10. Графики изменения показаний уровнемера с комбинированным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане:

1—3 —  $p = 16$  МПа; 10; 4

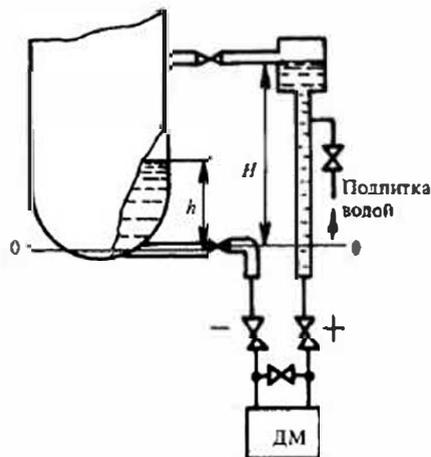


Рис. 11.11. Схема измерения уровня конденсата греющего пара в подогревателях

уровня жидкостей в объектах электростанций или промышленных предприятий. 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. 11.11). Перепад давления, действующий на дифманометр, определяется выражением

$$\Delta p = [H\rho_3 - h\rho' - (H-h)\rho'']g,$$

или

$$\Delta p = [H(\rho_3 - \rho'') - h(\rho' - \rho'')]g,$$

где  $\rho_3$ ,  $\rho'$ ,  $\rho''$  — плотности воды в плюсовой импульсной трубке, конденсата и пара.

Схема измерения уровня в конденсаторе турбины представлена на рис. 11.12. В схеме показан однокамерный уравнительный сосуд 1, посредством трубки 2 соединенный с паровым пространством конденсатора 3. Для того чтобы испарение воды в сосуде не приводило к уменьшению уровня, а также для стабилизации температуры воды в плюсовой импульсной

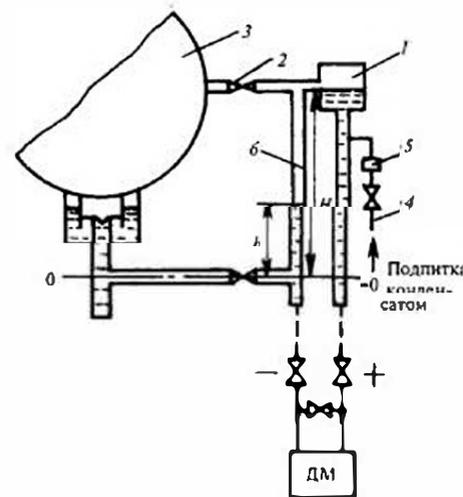


Рис. 11.12. Схема измерения уровня в конденсаторе турбины:

1 — однокамерный уравнительный сосуд; 2, 4, 6 — трубки; 3 — конденсатор; 5 — дифманометр

трубке в нее непрерывно по трубе 4 через ограничительную диафрагму 5 подается конденсат из напорной линии конденсатного насоса. Избыток конденсата стекает по трубкам 2, 6 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:  $\Delta p = (H-h)\rho'g$ . В реальных условиях часто необходимо измерять уровень пароводяной смеси, причем пар барботирует через слой жидкости и его количество зависит от режима работы установки (например, уровень в барабанах-сепараторах, парогенераторах). Очевидно, что в этом случае в уравнения перепада давления  $\Delta p$ , действующего на дифманометр, должна входить не плотность воды  $\rho'$ , а плотность пароводяной смеси, зависящая от паросодержания. При барботаже пара через слой воды и дырчатый лист создается дополнительный перепад давления, зависящий от конструктивных особенностей барабана и его нагрузки.

Кроме того, образуются вертикальные циркуляционные потоки воды вдоль стенок барабана (т.е. между местами отбора давлений на дифманометр), что также создает дополнительный перепад давления. Эти перепады могут быть определены только экспериментально. Дополнительные трудности измерения уровня в таких объектах связаны с неспокойной поверхностью среды и возможным различным паросодержанием по длине. Частичное уменьшение влияния перечисленных факторов может быть достигнуто установкой в барабан успокоителей (например, вертикальных цилиндров с боковыми отверстиями), к которым подключаются импульсные трубки дифманометров и уменьшением расстояния между местами отбора давлений на дифманометр.

Однако существует сложность измерения уровня в переходных режимах. Например, при резком сбросе давления в барабан из-за увеличения паросодержания начнет повышаться физический уровень смеси, но дифманометр-уровнемер может это не зафиксировать, поскольку уменьшилась плотность пароводяной смеси. Дополнительную опасность представляет возможное вскипание и понижение уровня воды в уравнительном сосуде.

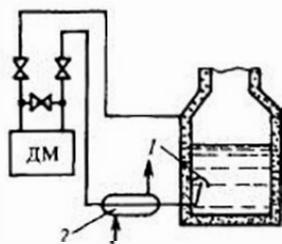


Рис. 11.13. Схема измерения уровня низкокипящих сред дифманометром:

1 — колпачковое устройство;  
2 — камера с тепловой рубашкой

можно 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, при этом нижняя импульсная трубка будет заполнена газом. В тех случаях, когда разность температур между контролируемой средой и средой, окружающей резервуар, меньше 50 °С, для уменьшения пульсации давления в плюсовой импульсной трубке на ней вблизи резервуара устанавливается камера с тепловой рубашкой 2, в которую подается греющая среда. Этим обеспечивается надежное испарение жидкости в пространстве под колпачком.

Верхние пределы измерений или сумма абсолютных значений нижнего и верхнего пределов измерений дифманометров-уровнемеров выбираются из ряда: 0,25; 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63 м.

Метод измерения уровня дифманометрами обладает рядом достоинств: 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.п.

Дифманометры в качестве измерителей уровня нашли применение также и в криогенной технике для измерения уровня криогенных сред. Особенностью подключения дифманометров-уровнемеров к емкостям является отсутствие уравнительных сосудов (рис. 11.13). Импульсные трубки выводятся из газовой полости и части, заполненной жидкостью, причем последняя трубка выводится горизонтально для исключения возможного влияния столба жидкости в ней. Если нижняя импульсная трубка будет заполнена жидкостью, то при ее испарении порциями воз-

### 11.3. Поплавковые и буйковые уровнемеры

Поплавковым называется уровнемер, основанный на измерении положения поплавка, частично погруженного в жидкость, причем степень погружения поплавка (осадка) при неизменной плотности жидкости не зависит от контролируемого уровня. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости, и, следовательно, по его положению может быть определено значение уровня. В статическом режиме на поплавок действуют: сила тяжести  $G$  и выталкивающие силы жидкости и газовой среды. При перемещении поплавка появляется также сила сопротивления в подвижных элементах уровнемера. Если пренебречь силой сопротивления кинематики и выталкивающей силой газовой фазы, то действующие на поплавок силы связаны уравнением  $G = V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} g$ , где  $V_{\text{ж}}$  — объем погруженной части поплавка,  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости.

Объем  $V_{\text{ж}}$  однозначно определяет осадку (глубину погружения) поплавка. При изменении плотности контролируемой жидкости на  $\Delta \rho_{\text{ж}}$  изменяется объем погруженной части на  $\Delta V_{\text{ж}}$ , что приводит к изменению осадка, т.е. к появлению дополнительной погрешности. Выражение для  $\Delta V_{\text{ж}}$  можно получить в виде

$$\Delta V_{\text{ж}} = \left( \frac{\partial V_{\text{ж}}}{\partial \rho_{\text{ж}}} \right) \Delta \rho_{\text{ж}} = -V_{\text{ж}} \frac{\Delta \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}$$

Таким образом, объем погруженной части  $V_{\text{ж}}$ , а следовательно, осадка поплавка, является параметром, определяющим дополнительную погрешность, вызванную изменением плотности контролируемой жидкости. Для снижения этой погрешности целесообразно уменьшить осадку поплавка, что может быть достигнуто либо увеличением площади поперечного сечения поплавка, либо облегчением поплавка.

В простейшем случае поплавок соединен с указателем с помощью гибкой механической связи. Размеры поплавка ограничиваются размерами уровнемера, масса поплавка не может быть сильно уменьшена из-за необходимости обеспечения требуемого натяжения гибкого элемента и преодоления сил трения. Сила сопротивления определяется выбором схемы связи поплавка с измеритель-

ной схемой уровнемера. Такая конструкция имеет большой диапазон измерения, но не обеспечивает хорошей герметизации резервуара, поэтому используется только при небольшом избыточном давлении или разрежении и невысоких температурах контролируемой среды. Примером такого уровнемера являются уровнемеры типа УДУ. Они предназначены для измерения уровня нефтепродуктов с температурой ( $-50...50$ ) °С, в интервале избыточных давлений ( $-1,5...3$ ) кПа. Диапазоны измерения  $0...12$  или  $0...20$  м, основная погрешность  $\pm 4$  мм.

При более высоких значениях температуры и давления среды используются поплавковые уровнемеры с магнитными преобразователями. Примером таких приборов являются магнитные уровнемеры типа ПМП (рис. 11.14) НПП «СЕНСОР».

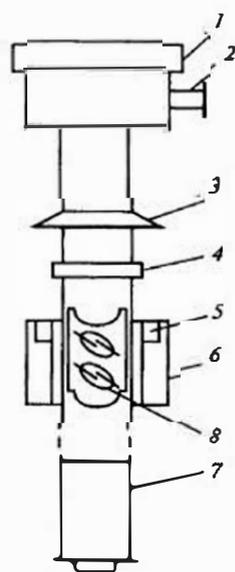


Рис. 11.14. Схема уровнемера ПМП:

1 — корпус; 2 — кабельный вывод; 3 — зонтик; 4 — стопорное кольцо; 5 — постоянный магнит; 6 — поплавок; 7 — направляющая трубка; 8 — гермоновое реле

По направляющей трубе 7 под влиянием изменения уровня жидкости перемещается поплавок 6 с постоянным магнитом 5. Внутри трубки 7 по всей ее длине находятся герконовые реле, которые срабатывают под действием магнитного поля поплавка. Стопорное кольцо 4 ограничивает перемещение поплавка вверх, а зонтик 3 защищает его от капель конденсата, который может образовываться на внутренних стенках резервуара. При диапазоне измерения от 0,5 до 6 м высота уровня измеряется с дискретностью 5 мм. При определении массы для учета изменения плотности жидкости в преобразователе производится измерение температуры. Эти преобразователи могут иметь в качестве выходной величины изменение сопротивления, токовый сигнал  $4...20$  мА или цифровой.

Магнитные поплавки входят в состав ультразвуковых уровнемеров.

**Буйковыми** называются уровнемеры, основанные на законе Архимеда: зависимости выталкивающей силы, действующей на буюк, от уровня жидкости. Чувствительным элементом таких уровнемеров является массивное тело (например, цилиндр) — буюк, подвешенное вертикально внутри сосуда и частично

погруженное в контролируемую жидкость (рис. 11.15). Буюк закреплен на упругой подвеске с жесткостью  $c$ , действующей на буюк с определенным усилием (на рис. 11.15 таким элементом является пружина). Увеличивая уровень на  $h$  от нулевого положения 00, увеличиваем выталкивающую силу, что вызывает подъем буйка на  $x$ , причем при его подъеме 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  $c$  — жесткость подвески;  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{г}$  — плотность жидкости и газа;  $F$  — площадь поперечного сечения буйка.

Отсюда легко получить выражение для статической характеристики буйкового уровнемера:

$$x = h/[1 + c(\rho_{ж} - \rho_{г})gF]$$

Таким образом, статическая характеристика буйкового уровнемера линейна, причем чувствительность его может быть изменена за счет увеличения  $F$  или уменьшения жесткости подвески  $c$ .

При большой жесткости подвески буюк перемещаться не будет, однако при изменении уровня изменится усилие, с которым он действует на подвеску. В этом случае при увеличении уровня на  $h$  изменение усилия равно  $hF(\rho_{ж} - \rho_{г})g$ . Такой принцип используется, например, в буйковых уровнемерах типов Салфир-22ДУ, УБ-Э, ПИУП (ранее УБ-П). Последние уровнемеры снабжены преобразователями с силовой компенсацией (УБ-Э) с унифицированным токовым выходным сигналом, УБ-П и ПИУП с унифицированным пневматическим выходным сигналом).

Схема уровнемера с электросиловым преобразователем изображена на рис. 11.16. Буюк 1 подвешен на конец рычага 2, на другом конце которого расположен груз 3, уравнивающий вес буйка 1 при нулевом уровне (возможен и другой метод компенсации веса). Разделительная мембрана 4 служит для герметизации резервуара.

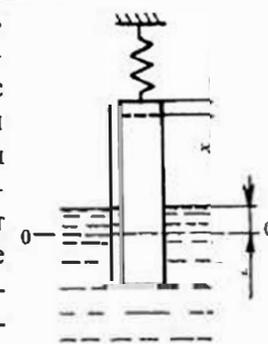


Рис. 11.15. Расчетная схема буйкового уровнемера

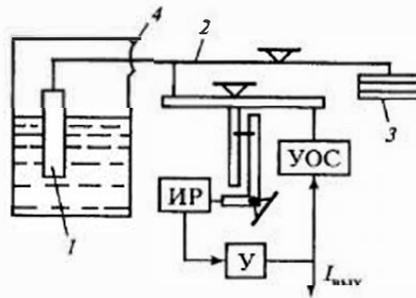


Рис. 11.16. Схема буйкового уровнемера с электросиловым преобразователем:  
1 — боек; 2 — рычаг; 3 — груз; 4 — разделительная мембрана

электросилового преобразователя, который развивает усилие, устраняющее небаланс сил (принцип действия электросиловых преобразователей см. в § 10.4).

Уровнемеры УБ предназначены для измерения уровня невязких и вязких, невыпадающих в осадок, не кристаллизующихся сред при давлении — (4...16) МПа и температурах от -200 до 200 °С, плотность среды (600...2500) кг/м<sup>3</sup>. Верхние пределы измерений выбираются из ряда от 0,02 до 16 м, основная погрешность ±1; 1,5%. В уровнемерах для химических производств с пневматическим выходным сигналом типов УБК-1 и ДБУ-1 используется другой тип вывода от буйка — с помощью торсионной трубки, к выводу которой крепится заслонка пневмопреобразователя. Уровнемеры ДБУ-1 используются на средах с температурой 5...230 °С при давлении до 2,5 МПа и плотностью 700...1410 кг/м<sup>3</sup>. Верхний предел измерения (0,4...6) м, основная погрешность ±2,5%.

#### 11.4. 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 ее уровня.

При изменении уровня изменяется усилие, с которым боек действует на рычаг. Небаланс сил приводит к смещению рычага и сердечника дифференциально-трансформаторного преобразователя, выполняющего функцию индикатора рассогласования ИР. Его выходной сигнал поступает на усилитель У, выходной ток  $I_{\text{вых}}$  поступает на выход прибора и в устройство обратной связи УОС. Последнее представляет собой

Конструкция конденсаторных преобразователей различна для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей. Электропроводными считаются жидкости, имеющие удельное сопротивление  $\rho < 10^6$  Ом·м и диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{\text{ж}} \geq 7$ . 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.

Конденсаторный преобразователь для неэлектропроводных жидкостей, состоящий из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, помещенных в резервуар 3, в котором производится измерение уровня, изображен на рис. 11.17, а.

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

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 H / \ln(d_2/d_1) \quad (11.7)$$

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 внутреннего и наружного электродов.

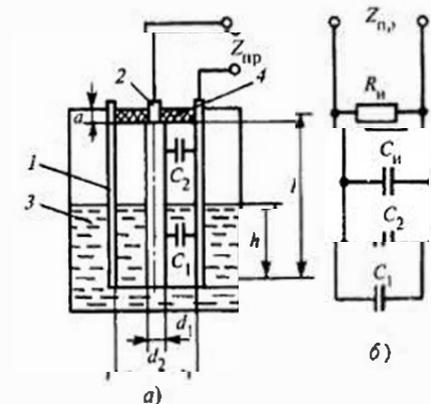


Рис. 11.17. Схема конденсаторного преобразователя уровня для неэлектропроводных сред:  
1, 2 — электроды; 3 — резервуар; 4 — изолятор

На основании (11.7) легко записать выражения для емкости  $C_1$  части преобразователя, находящейся в жидкости, 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  $C_{и}$  проходного изолятора и его активным сопротивлением  $R_{и}$  (емкость  $C_{и}$  образуется электродами преобразователя на участке  $a$ ; сопротивление  $R_{и}$  обусловлено проводимостью материала изолятора на этом участке), а также емкостью и проводимостью соединительного кабеля.

Таким образом, электрическая схема преобразователя имеет вид, изображенный на рис. 11.17, б. Суммарная емкость преобразователя

$$C_{пр} \approx C_1 + C_2 + C_{и}.$$

Емкость  $C_{и}$  от значения  $h$  не зависит, кроме того, для газов  $\epsilon_r \approx 1$ , поэтому

$$C_{пр} = C_{и} + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(d_2/d_1)} H [1 + (\epsilon_{ж} - 1) h/H].$$

Таким образом, при  $\epsilon_{ж} = \text{const}$  емкость  $C_{пр}$  однозначно зависит от измеряемого уровня  $h$ . В реальных условиях  $\epsilon_{ж}$  может изменяться (например, при изменении температуры жидкости, ее состава и т.п.).

Для уменьшения влияния изменения  $\epsilon_{ж}$  на показания уровнемера обычно используется компенсационный конденсатор (рис. 11.18). 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. 11.17 неизмеряемого уровня, обусловленного высотой  $h_k$  электродов компенсационного конденсатора. Отрицательное влияние на работу емкостных уровнемеров оказывает активное сопротивление преобразователя. Оно складывается из активного сопротивления проходного изолятора (см.  $R_{и}$  на рис. 11.17, б) и активного сопротивления контролируемой жидкости в межэлектродном пространстве (обычно значение последнего пренебрежимо мало). Для уменьшения влияния 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. 11.19, а изображена схема преобразователя, выполненного в виде стержня (электрода) 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, изображенном на рис. 11.19, б. Зависящую от уровня емкость преоб-

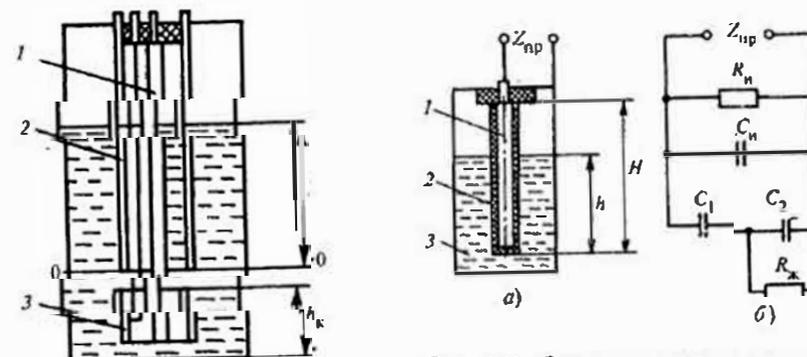


Рис. 11.18. Схема преобразователя с компенсационным конденсатором:  
1, 2 — электроды; 3 — дополнительный электрод

Рис. 11.19. Схема конденсаторного преобразователя уровня для электропроводящих жидкостей:  
1 — стержень (электрод); 2 — изоляция;  
3 — резервуар

разователя 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 — поверхности 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 растет. Параметр  $R_{ж}$  — активное сопротивление жидкости;  $C_{и}$ ,  $R_{и}$  — емкость и активное сопротивление проходного изолятора. Таким образом, полная емкость преобразователя определяется выражением

$$C_{пр} = C_{и} + C_1 C_2 / (C_1 + C_2).$$

Как и в схеме рис. 11.19, 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 различные схемы. Наиболее простыми являются мостовые схемы, примером которых может быть схема электронного индикатора уровня ЭИУ (рис. 11.20). Мост состоит из двух вторичных обмоток I и II трансформатора Тр (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. С помощью усилителя этот сигнал усиливается, преобразуется в унифицированный и измеряется вторичным прибором ВП.

Более сложная измерительная схема используется в уровнемерах типа РУС (рис. 11.21). Работа схемы основана на емкостно-импульсном методе измерения уровня, использующем переходные процессы, протекающие в цепи емкостного преобразователя, периодически подключаемого к источнику постоянного напряжения. Измерительный конденсаторный преобразователь 1 и компенсационный конден-

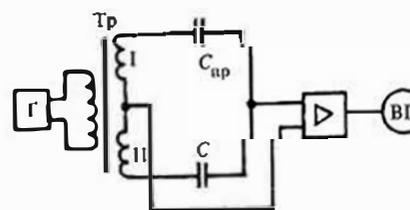


Рис. 11.20. Принципиальная схема электронного индикатора уровня

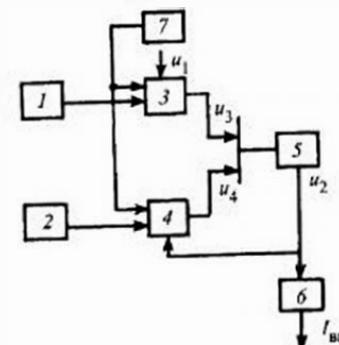


Рис. 11.21. Измерительная схема уровнемера РУС:

1 — конденсаторный преобразователь; 2 — компенсационный конденсатор; 3, 4 — преобразователи; 5 — импульсный детектор; 6 — усилитель; 7 — генератор тактовых импульсов

сатор 2 подключены к входам преобразователей 3, 4 емкости в электрической сигнал. В преобразователе 3 измерительный конденсатор 1 генератором тактовых импульсов 7 периодически подключается к постоянному напряжению  $u_1$ . В конце рабочего импульса генератор шунтирует измерительный конденсатор и разряжает его. За время импульса измерительный конденсатор зарядится до значения напряжения, которое зависит от значения емкости. Выходным сигналом преобразователя 3 является постоянное напряжение  $u_3$  импульсной формы, амплитуда которого определяется емкостью конденсатора, т.е. значениями контролируемого уровня и диэлектрической проницаемости среды. Преобразователь 4 имеет аналогичное исполнение, но питается напряжением  $u_2$ , пропорциональным выходному току  $I_{вых}$  (т.е. используется отрицательная обратная связь).

Таким образом, амплитуда выходного импульсного напряжения  $u_4$  преобразователя 4 зависит от емкости компенсационного конденсатора (т.е. диэлектрической проницаемости среды) и значения  $u_2$ . Сигналы с преобразователей 3 и 4 вычитаются и разностный сигнал подается на вход импульсного детектора 5, преобразующего импульсный сигнал в напряжение постоянного тока  $u_2$ . Напряжение  $u_2$  затем используется в качестве сигнала обратной связи и усилителем 6 преобразуется в унифицированный токовый выходной сигнал

$I_{\text{вых}}$ . В статическом режиме выходное напряжение  $u_2$  и ток  $I_{\text{вых}}$  принимают такие значения, при которых  $u_3 \approx u_4$ . При увеличении уровня и  $\varepsilon_{\text{ж}} = \text{const}$  будет увеличиваться  $u_3$ , что приведет к увеличению  $u_2$  и  $I_{\text{вых}}$ , так как увеличение  $u_4$  возможно только за счет увеличения  $u_2$  (при  $\varepsilon_{\text{ж}} = \text{const}$  емкость компенсационного конденсатора не изменяется). Предположим  $h = \text{const}$ , но увеличилась диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_{\text{ж}}$  при этом  $u_2$  и  $I_{\text{вых}}$  не должны измениться. Действительно, при этом увеличится  $u_3$ , но одновременно увеличится и значение  $u_4$  (при  $u_2 = \text{const}$ ), так как увеличилась и емкость компенсационного конденсатора. Верхние пределы уровнемеров РУС выбираются из ряда от 0,4 до 20 м, основная погрешность в зависимости от модификации 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 %. Уровнемеры применяются на диэлектрических или проводящих средах, агрессивных, взрывоопасных при температурах от  $-60$  до  $250$  °С при давлениях до 10 МПа. В емкостных уровнемерах может использоваться резонансная схема измерения емкости. При этом первичный преобразователь включен в схему колебательного контура, параметры которого изменяются с изменением контролируемого уровня. При этом либо измеряется амплитуда напряжения на контуре (при неизменной амплитуде и частоте питающего напряжения), либо резонансная частота контура. Такие схемы имеют некоторые модификации уровнемеров типа РУМБ, сигнализаторы типа СУС.

Емкостные уровнемеры получили широкое распространение особенно в качестве сигнализаторов из-за дешевизны, простоты обслуживания, удобства монтажа первичного преобразователя, отсутствия подвижных элементов возможности использования в широком интервале температур и давлений. Большим достоинством является нечувствительность к сильным магнитным полям, возможности использования в широком интервале температур (от криогенных до  $500$  °С) и давлений. К числу недостатков следует отнести непригодность для измерения уровня вязких (динамическая вязкость более  $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ), пленкообразующих, кристаллизующихся жидкостей и содержащих примеси, выпадающие в осадок, высокую чувствительность к изменению электрических свойств жидкости и изменению емкости кабеля, соединяющего первичный преобразователь с измерительным прибором. Последний недостаток устраняется при размещении электронной части в головке преобразователя. В этом случае емкостной стержневой преобразователь напоминает термопреобразователь. Так, стержневой емкостной уровнемер типа Мер-

сар фирмы Siemens может иметь длину до 5 м при диаметре трубки 24 мм, измеряемая емкость составляет 3,3...3300 пФ. Гибкая конструкция преобразователя может иметь длину до 35 м. Преобразователи работают при температурах от  $-200$  до  $400$  °С при давлениях от вакуума до 50 МПа. При выходном сигнале 4...20 мА преобразователь имеет цифровой сигнал по HART-протоколу, погрешность измерения составляет  $\pm 0,1$  %.

### 11.5. Индуктивные уровнемеры

Принцип действия индуктивных уровнемеров основан на зависимости индуктивности одиночной катушки или взаимной индуктивности двух катушек от глубины их погружения в электропроводную жидкость. Такая зависимость обусловлена возникновением в жидкости под воздействием магнитного поля переменного тока возбуждения вихревых токов, магнитное поле которых оказывает размагничивающее действие на поле тока возбуждения. Действительно, по определению индуктивность  $L$  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 преобразователь 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).

При изменении индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  обеих катушек изменяется их взаимная индуктивность  $M$  и 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 намоткой в два провода, при этом  $L_1 = L_2 = L$  и  $k \approx 1$ .

Из принципа действия уровнемеров видно, что они пригодны для измерения уровня только электропроводных сред. Кроме того,

поскольку интенсивность вихревых токов зависит от электропроводности среды, ее изменение в процессе измерения вызовет появление дополнительной погрешности. Эти уровнемеры получили наибольшее распространение для измерения уровня жидкометаллического теплоносителя в энергетических установках.

Простейшая схема индуктивного трансформаторного преобразователя представлена на рис. 11.22, а. Преобразователь состоит из обмотки возбуждения 1, по которой протекает переменный ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , 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 обмоток, кроме концевых участков, длиной, равной их диаметру, где характеристика искривляется.

Таким образом, ЭДС  $E = \omega M I_{\text{в}}$  во вторичной обмотке, а следовательно, и выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  будут линейно зависеть от уровня. Из рис. 11.22, а видно, что взаимодействие полей возбуждения и вихревых токов осуществляется через металлический защит-

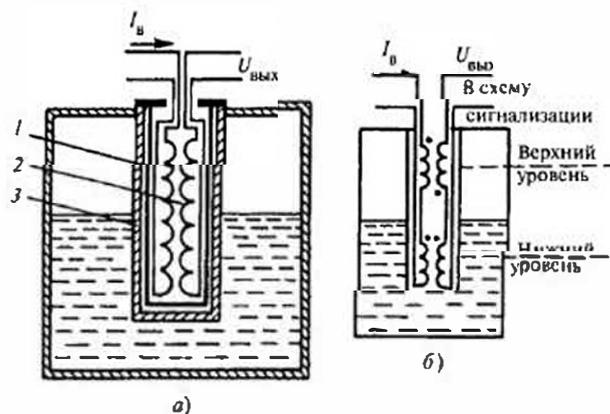


Рис. 11.22. Схема индуктивного трансформаторного преобразователя уровня: а — аналогового уровнемера; 1 — обмотка возбуждения; 2 — вторичная обмотка; 3 — металлический защитный чехол; б — сигнализатора предельных значений уровня

ный чехол, который ослабляет поля и, следовательно, ухудшает чувствительность преобразователя, причем экранирующее действие чехла увеличивается с ростом частоты  $\omega$  тока возбуждения  $I_{\text{в}}$ . 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).

Основной недостаток трансформаторных преобразователей уровня — 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 изменением 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 оксидов. 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. 11.22, 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.

Перечисленные факторы оказывают меньшее влияние на работу индуктивных уровнемеров дискретного действия. В таких уровнемерах фиксируется достижение определенных значений уровня, т.е. указатель переместится на соседнюю отметку только при изменении

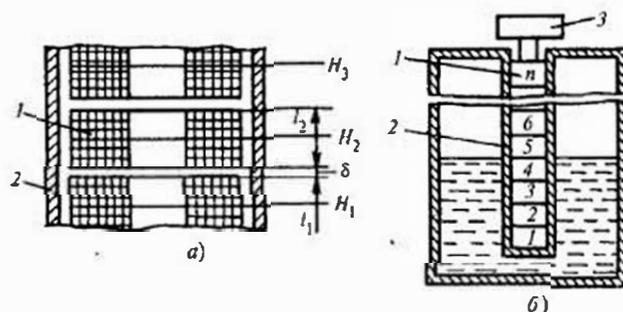


Рис. 11.23. Схема индуктивного преобразователя дискретных уровнемеров: а — фрагмент уровнемера; б — схема уровнемера; 1 — катушки индуктивности; 2 — металлический чехол; 3 — головка преобразователя

уровня на определенное значение — шаг дискретности. Преобразователь дискретного уровнемера представляет собой ряд коротких катушек индуктивности  $l$  (рис. 11.23, а), помещенных в виде столба внутри металлического чехла 2, отделяющего катушки от среды (рис. 11.23, б). Как уже указывалось, индуктивность катушки зависит от глубины ее погружения в среду, поэтому индуктивность и комплексное сопротивление катушки, расположенной ниже уровня, имеет другое значение, чем катушки, расположенной выше уровня. В головке преобразователя 3 располагаются вспомогательные катушки, индуктивность которых от уровня не зависит. Все рабочие 1, 2, 3, ...,  $n$  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.

Рассмотрим рис. 11.23, 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  $H_2—H_3$ . Индуктивности катушек не изменяются, т.е. показания

приборов также не изменяются. Изменение показаний происходит только при достижении уровнем значений  $H_1, H_2$ .

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 за счет 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 или его оксидов не приведет к нарушению работоспособности прибора. Действительно, перечисленные факторы могут только уменьшить степень изменения индуктивности катушек, погруженных в металл относительно «сухих», что не влияет на работу следящей системы. Суммируя сказанное, можно перечислить достоинства дискретных индуктивных уровнемеров: независимость показаний от изменения температуры среды и наличия на чехле пленок расплава или окислов (при измерении уровня металла).

В настоящее время выпускаются дискретные индуктивные уровнемеры типа КВАНТ-10, предназначенные для измерения уровня жидкометаллического теплоносителя с температурой до 550 °С и давлением до 1,5 МПа. В зависимости от диапазона измерения основная погрешность равна  $\pm 2,5$  или  $\pm 4$  %. Дискретный индуктивный метод измерения используется в уровнемере КВАНТ-11, предназначенном для измерения уровня воды при температуре насыщения с небольшим паросодержанием. В таких уровнемерах ферромагнитный поплавок, занимая положение против какой-либо катушки, увеличивает ее индуктивность. Логическая схема уровнемера отыскивает эту катушку и по ее расположению и известным геометрическим размерам преобразователя определяет уровень. При диапазоне измерения 0...3 м основная погрешность уровнемера  $\pm 50$  мм.

## 11.6. Радиоволновые уровнемеры

Рассмотренные уровнемеры можно считать уровнемерами общепромышленного назначения, так как они могут быть использованы в подавляющем большинстве случаев, требующих измерения уровня. Существуют, однако, технологические процессы, требующие изме-

рения 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 температурой жидкого металла, агрессивностью жидкого металла и шлака, разнообразием конструкций объектов измерения, требуемой высокой точностью измерения и надежностью работы.

Перспективным методом измерения уровня является радиоволновой метод. Радиоволновыми называются уровнемеры, основанные на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня жидкости.

К радиоволновым методам относятся радиолокационный, радиоинтерференционный, эндовибраторный и резонансный.

Работа радиолокационных уровнемеров основывается на явлении отражения электромагнитных волн от границы раздела сред, различающихся электрическими и магнитными свойствами.

Скорость 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. 11.24) состоит из излучателя 1, приемника электромагнитной энергии 2 и преобразователя 3 измерения интервала времени. Уровень  $h$  определяется измерением временного интервала между моментом посылки 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 неэлектропроводная). 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 показания уровнемера практически не зависящими от свойств жидкости. Недостатком таких уровнемеров является трудность точного измерения малых интервалов времени. Они чувствительны к нахождению в зоне излучения посторонних предметов, например металлических стенок емкостей. Для устранения этого недостатка необходимо применить узконаправленное излучение с помощью рупорных антенн.

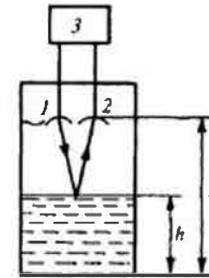


Рис. 11.24. Схема радиолокационного уровнемера:

1 — излучатель; 2 — приемник электромагнитной энергии; 3 — преобразователь измерения интервала времени

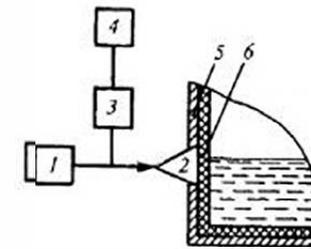


Рис. 11.25. Схема радиолокационного уровнемера для контроля уровня жидких металлов

1 — генератор; 2 — рупор; 3 — детектор; 4 — вторичный преобразователь; 5 — стенка; 6 — футеровочный материал

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. 11.25. 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 металлические стенки 5 вставляются рупорные излучатели 2. Внутренний футерованный материал 6 является радиопрозрачным.

Радарные уровнемеры SITRANS LR 300 (фирма Siemens) используют микроволновую импульсную технологию. Они оснащены рупорными или стержневыми антеннами, работающими на частоте 5,8 ГГц. Уровнемеры могут измерять высоту уровня жидких и сыпучих сред в диапазоне до 20 м с погрешностью  $\pm 0,15\%$ . При выходном сигнале 4...20 мА уровнемер может иметь и цифровой в соответствии с протоколами Modbus, HART и Profibus-PA.

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 техноло-

гической 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. 11.26). Применение резонансных уровнемеров 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 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. 11.26, но на конце его вместо металлического доньшка закреплен виток проволочного 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  $\pm 2\%$ .

Для кристаллизаторов малого сечения (с максимальным поперечным размером сечения 150 мм) применение преобразователя с индуктивной нагрузкой неэффективно, так как при уменьшении раз-

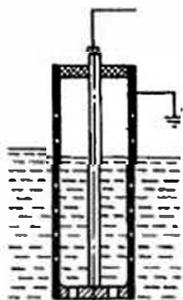


Рис. 11.26. Схема преобразователя резонансного уровнемера

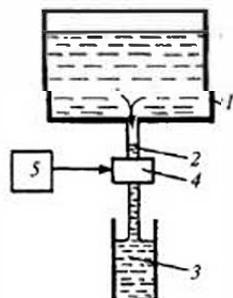


Рис. 11.27. Схема резонансного уровнемера для машин непрерывного литья заготовок малых диаметров:  
1 — промежуточный ковш; 2 — трубка; 3 — кристаллизатор;  
4 — металлическое кольцо; 5 — высокочастотный генератор

меров витка уменьшается диапазон измерения. Для таких кристаллизаторов разработан уровнемер (рис. 11.27), в котором система «металл промежуточного ковша 1 — струя металла 2 — металл кристаллизатора 3» рассматривается как измерительный отрезок длинной электрической линии, длина которого, а следовательно, и резонансная частота определяются уровнем металла в кристаллизаторе.

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.

Резонансный метод измерения использован в уровнемерах для криогенных сред типа УРК-1. Здесь в качестве чувствительного элемента используется отрезок волновода, информационным параметром является его резонансная частота, функционально связанная с контролируемым уровнем. Электронная схема прибора содержит генератор электрических колебаний, частота которых непрерывно поддерживается равной резонансной частоте волновода. Она измеряется частотомером и преобразуется в выходной сигнал.

## 11.7. 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, в связи с чем они получили название ультразвуковых. 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 слои жидкости и газа. В резонансных уровнемерах измерение уровня производится посредством измерения частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от высоты уровня.

Наибольшее распространение получили локационные уровнемеры. Локация уровня может производиться либо через газовую среду над жидкостью, либо снизу через слой жидкости. Недостатком первого типа уровнемеров являются погрешность от зависимости скорости звука от давления и температуры газа и сильное поглощение ультразвука газом, что требует большей мощности источника, чем при локации

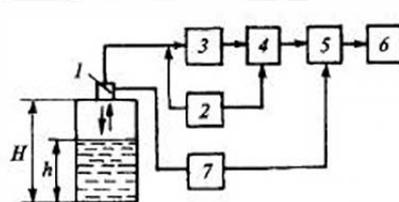


Рис. 11.28. Упрощенная схема акустического уровнемера:

1 — акустический преобразователь; 2 — генератор; 3 — усилитель; 4 — схема измерения времени; 5 — преобразователь; 6 — вторичный прибор; 7 — блок температурной компенсации

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.

Упрощенная схема акустического уровнемера с локацией уровня со стороны газа ЭХО-1 представлена на рис. 11.28. Источником и одновременно приемником отраженных ультразвуковых колебаний является пьезоэлемент, заключенный в акустический преобразователь 1. Локация осуществляется ультразвуковыми импульсами, которые возбуждаются пьезоэлементом в результате подачи на него электрических импульсов от генератора 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 термопреобразователь сопротивления, расположенный внутри акустического преобразователя.

Примером использования акустического метода является серийно выпускаемый преобразователь уровня ЭХО-5, предназначенный для измерения уровня жидкостей (в том числе агрессивных), а также слепучих и кусковых материалов при температуре от  $-50$  до  $170$  °С и при давлении до 4 МПа. Верхние пределы измерения уровнемера:

0,4...30 м, основная погрешность преобразователя в зависимости от модификации равна  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1,0$ ;  $\pm 1,5$ ;  $\pm 2,5$  %.

Ультразвуковой метод характерен очень малым подводом теплоты в контролируемую среду, поэтому может быть использован в криогенной технике. Однако метод применим только на жидкостях со спокойной поверхностью, т.е. исключаются кипящие жидкости и криостаты с загруженным внутренним объемом.

Фирма Siemens производит более десяти типов ультразвуковых уровнемеров, предназначенных для различных отраслей промышленности, сельского и коммунального хозяйства. В некоторых типах в одном приборе объединены источники (приемники) излучения (сенсоры) с электронным преобразователем, в других они разнесены. Совмещенный вариант реализован в компактных приборах типа «The Probe», предназначенных для измерения уровня в диапазоне от 0,25 до 8 м. Сенсор работает на частоте 43 кГц, выходной сигнал уровнемера составляет 4...20 мА, погрешность не превышает  $\pm 0,25$  %, благодаря введению температурной компенсации. Измерительный преобразователь LU 10 может работать с десятью сенсорами, которые могут отстоять от измерительного блока на расстояние до 365 м. При диапазоне измерения до 60 м и наличии температурного зонда погрешность измерения уровня составляет  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,25$  %. Выходной сигнал 4...20 мА может сочетаться с цифровым наиболее распространенных протоколов.

На явлении отражения ультразвука построена схема уровнемера типа РУ-ПТ1, который является более поздним вариантом РУМБ-БК-М (з-д «Теплоприбор» г. Рязань). Принцип действия уровнемера основан на измерении времени распространения фронта ультразвуковых колебаний в металлическом стержне от поплавка до нулевой отметки на нижнем конце первичного преобразователя (рис. 11.29). Уровнемер состоит из преобразователей: первичного ПП, промежуточного ПР и передающего ПЕР. В состав первичного преобразователя входит источник ультразвуковых колебаний 1, погружаемый в контролируемую среду металлический стержень 2 и перемещающийся вдоль него поплавок 3. Источником формируется ультразвуковой импульс и снимаются со стержня сигналы, отраженные от поплавка и участка стержня, соответствующего нулевому уровню. Промежуточный преобразователь усиливает их и в виде двух импульсов напряжения  $U_1$  и  $U_2$  подает на передающий преобразователь. По моменту начала импульса, задаваемому генератором Г, и времени поступления импульсов вычисляется время  $t_1$  прохождения импульса в стержне от поплавка до нулевой отметки

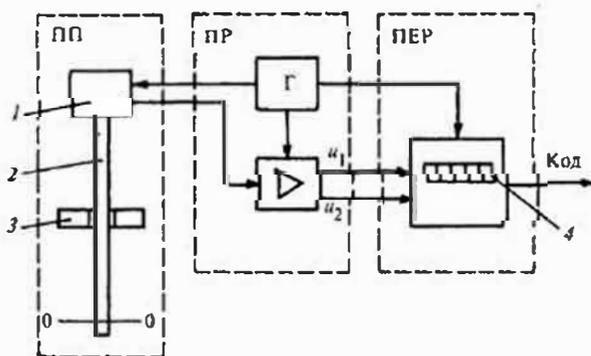


Рис. 11.29. Схема ультразвукового уровнемера:

1 — источник ультразвуковых колебаний; 2 — металлический стержень; 3 — поплавок; 4 — индикатор

(т.е. в пределах контролируемого уровня). Для учета температурного удлинения стержня по импульсу  $U_2$  вычисляется время  $t_2$  прохождения импульса по всему стержню. Значение контролируемого уровня определяется по формуле  $h = H_0(t_1/t_2)$ , где  $H_0$  — базовая длина стержня при температуре  $20 \pm 5$  °С. Верхний предел измерения высоты уровня составляет 0,4...12 м, выходные сигналы: токовый 0...5 (4...20) мА, цифровая индикация уровня в м, цифровой сигнал по интерфейсу RS-232C, RS-485, сигнализация двух предельных отклонений уровня. Уровнемер предназначен для широкого класса сред (в том числе нефтепродуктов и сжиженных газов) при температурах -40...120 °С и давлении до 2,5 МПа, основная погрешность составляет  $\pm 4$  мм.

К ультразвуковым относятся уровнемеры типа ДУУ2, ДУУ4 ЗАО «Альбатрос», в которых используется магнестрикционный эффект. Последний состоит в деформации кристаллического тела под воздействием магнитного поля. Преобразователь этих уровнемеров содержит диэлектрическую направляющую трубку, внутри которой находится стальная проволока с намотанной по всей длине катушкой. По наружной поверхности трубки, покрытой фторопластом, скользит магнитный поплавок, плавающий на поверхности жидкости или границе раздела сред. В месте размещения поплавка происходят локальные изменения в кристаллической решетке проволоки. При подаче в катушку импульса тока создается импульсное магнитное поле, вызывающее импульсную деформацию проволоки. При достижении последней поплавка возникает отраженный

импульс продольной деформации, воспринимаемой пьезодатчиком. Положение уровня определяется по интервалу времени от момента формирования импульса тока до приема импульса упругой деформации. На направляющей трубке может размещаться до четырех магнитных поплавков, измеряющих, например, верхний уровень и три границы раздела сред. В гибкой модификации преобразователя катушка с проволокой покрыта фторопластовой изоляцией. Для натяжения проволоки к ее концу крепится груз или опорный магнит. На конце преобразователя размещаются датчики давления и температуры.

Максимальная измеряемая высота уровня составляет 25 м, избыточное давление не должно превышать 2 МПа, а температура 120 °С при плотности среды от 500 до 1500 кг/м<sup>3</sup>. Основная погрешность в зависимости от исполнения составляет  $\pm 1$ ;  $\pm 3$ ;  $\pm 5$  мм. Число выходных сигналов 4...20 мА достигает шести в зависимости от числа измеряемых величин.

## 11.8. 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, причем чувствительность преобразователя увеличивается с ростом температурного коэффициента электросопротивления материала.

Термокондуктометрический преобразователь помещается в резервуар таким образом, что часть его находится в жидкости, остальная часть — в газовом пространстве (рис. 11.30). При изменении уровня изменяется длина этих участков. Так как в общем случае температура жидкости и ее паров может быть одинаковой, то происходит подогрев преобразователя. Прямой подогрев осу-

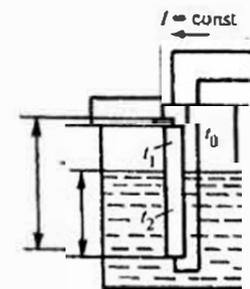


Рис. 11.30. Схема термокондуктометрического преобразователя уровня

шестьюется проходящим через преобразователь 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. Предположим, что при отсутствии жидкости «сухой» 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

$$\Delta R = R_h - R_0 = r_0 \alpha h (t_2 - t_1). \quad (11.8)$$

Из (11.8) следует, что статическая характеристика преобразователя линейна. 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 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 применяются уровнемеры, использующие явление сверхпроводимости. Эффект сверхпроводимости состоит в том, что при температуре металла ниже критической  $T_k$  его сопротивление становится нулевым. Поэтому, 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 ниобий-титанового сплава. Для уменьшения выделяемой на преобразователе мощности он может питаться

постоянным напряжением импульсной формы. Учитывая широкое развитие высокотемпературной сверхпроводимости, можно предположить скорое появление уровнемеров подобного типа для жидкого азота, кислорода, водорода.

Термокондуктометрические преобразователи обычно изготавливают 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 температур 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 зависят от отклонения расчетных значений величин, определяющих его статическую характеристику (11.8). 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 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 вторичного прибора.

## 11.9. 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 горизонтали под углом естественного откоса, причем этот угол при заполнении или опорожнении емкости может быть различным. Ограниченная подвижность частиц приводит 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 стенки, что ограничивает применение методов измерения уровня, основанных на зависимости давления от уровня (по типу гидростатических).

Отрицательными качествами сыпучих материалов является 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 материалов являются массовые, основанные на взвешивании бункера вместе с заполняющим его материалом. В качестве преобразователя в этих уровнемерах может быть использована гидравлическая мессдоза, которая служит опорой одной из лап бункера. Мессдоза представляет собой стальной корпус с поршнем, на который опирается лапа бункера. Поршень давит на герметизирующую металлическую мембрану. Внутренняя полость корпуса (под мембраной) заполнена жидкостью и соединена с манометром. Давление жидкости в системе мессдоза-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 погрешность не более  $\pm 5\%$ ). Основной элемент таких преобразователей — 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 зависит от степени деформации преобразователя, т.е. от количества материала в бункере.

Из всех электрических методов измерения уровня наиболее применимым является емкостный 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.

Основной недостаток таких уровнемеров — разрушение изоляционного покрытия преобразователя, налипание материала, зависимость показаний от изменения электрических свойств материала, вызванного, например, изменением его состава или влажности.

Специфическим уровнемером для сыпучих материалов является лотовый (рис. 11.31). Чувствительным элементом таких уровнемеров представляет 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 отключает отсчетное устройство, одновременно включая механизм подъема лота *5*, возвращающее 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. По такой схеме работает уровнемер сыпучих тел УСТ-2 (пределы измерения 0...25 м, основная относительная погрешность  $\pm 2,5\%$ ).

Возможен бесконтактный вариант лотового уровнемера. В схеме такого уровнемера чувствительный элемент — лот не касается поверхности материала, а при любом уровне удерживается на определенном расстоянии от поверхности. Принцип действия основан на зависимости какого-либо реактивного параметра (емкости или индуктивно-

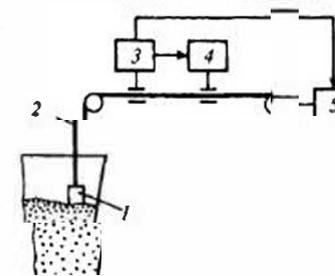


Рис. 11.31. Схема лотового уровнемера сыпучих материалов:

1 — лот; 2 — гибкий трос; 3 — сигнальное устройство; 4 — отсчетное устройство; 5 — механизм подъема лота

сти) чувствительного элемента — лота от положения относительно поверхности материала. Если при исходном положении лота уровень увеличился (т.е. поверхность материала приблизилась к лоту), то изменится его реактивный параметр и следящая система поднимет лот в такое положение, при котором значение реактивного параметра восстановится. Это означает, что положение лота относительно поверхности восстановилось, т.е. по положению лота можно судить об уровне материала. Положение лота измеряется электро-механической схемой и преобразуется в выходной сигнал. Примером такого уровнемера служит уровнемер РУДА-ЛОТ для сыпучих мелкодисперсных материалов. Его верхние пределы измерения от 6 до 40 м, класс 0,5, выходной сигнал аналоговый или цифровой.

Для сигнализации загрузки или опорожнения бункеров применяются сигнализаторы уровня. Среди сигнализаторов уровня электро-проводных материалов наиболее простыми являются кондуктометрические. Принцип действия таких сигнализаторов заключается в замыкании электрической цепи «стенка бункера—материал—электрод» при касании поверхностью материала электрода. Основные недостатки при эксплуатации: механическое разрушение электродов под действием материала, возможность ложных срабатываний из-за утечек через запыленную среду (обычно во избежание этого на электроды устанавливают охранные кольца). Надежная работа обеспечивается сигнализаторами, установленными в местах, где исключена возможность образования пустот. В качестве сигнализаторов уровня используются емкостные сигнализаторы с резонансной схемой измерения, например типа СУС (см. § 11.4). В таких устройствах емкостной преобразователь, образованный электродом и стенкой бункера или двумя электродами, совместно с катушкой индуктивности образуют колебательный контур. На него от высокочастотного генератора подается напряжение постоянной амплитуды фиксированной частоты, близкой к резонансной частоте контура при отсутствии среды в зоне чувствительного элемента. В этом случае с контура снимается сигнал максимальной амплитуды. Появление контролируемой среды в зоне чувствительного элемента вызывает изменение емкости, что приводит к изменению резонансной частоты и вызывает уменьшение амплитуды снимаемого с контура сигнала в соответствии с его амплитудно-частотной характеристикой. При определенной амплитуде снимаемого сигнала срабатывает выходное реле.

Находят применение также сигнализаторы с механическим чувствительным элементом. В сигнализаторе СУСМ — ПЭМ чувствительным элементом является механический щуп, поворачивающийся вокруг собственной оси до момента торможения контро-

лируемым материалом. Привод — пневматический, выходной дискретный сигнал — электрический или пневматический, погрешность срабатывания от  $\pm 1$  до  $\pm 10$  мм.

### Контрольные вопросы

1. Можно ли для измерения уровня воды использовать дифманометр с предельным номинальным перепадом 40 кПа при его расположении ниже минимального контролируемого уровня на 3 м. Резервуар открытый, максимальный уровень в нем 3 м?
2. Как изменятся показания дифманометрического уровнемера (завышение или занижение) при повышении давления и температуры воды? Первоначальное давление 7 МПа.
3. Зависит ли от текущего значения уровня абсолютная погрешность измерения уровня, вызванная отсутствием уравнительного сосуда?
4. Зависит ли коэффициент преобразования емкостного преобразователя уровня от соотношения диэлектрических проницаемостей жидкости и ее паров?
5. Изменяется ли при измерении уровня осадка буйка уровнемера, снабженного преобразователем с силовой компенсацией?
6. Изменяются ли показания индуктивного дискретного уровнемера при изменении электропроводности контролируемой среды?
7. Перечислите параметры термокондуктометрического преобразователя уровня, влияющие на коэффициент преобразования.

## 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 *количество вещества* и *расход*.

Количество вещества можно измерять либо в единицах массы [килограмм (кг), тонна (т)], либо в единицах объема [кубический метр ( $\text{м}^3$ ), литр (л)]. Расход есть количество вещества, протекающего через сечение трубопровода в единицу времени. В соответствии с выбранными единицами может производиться измерение либо массового расхода  $G_m$  (единицы кг/с, кг/ч, т/ч), либо объемного расхода  $G_0$  (единицы  $\text{м}^3/\text{с}$ , л/с,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ). Единицы массы и массового расхода дают более полные сведения о количестве или расходе вещества, чем единицы объема, так как объем вещества, 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  $p_n = 101,325 \text{ кПа}$  (760 мм рт. ст.) и относительную влажность  $\varphi = 0$ . В этом случае объемный расход обозначается  $G_n$  и выражается в объемных единицах (например,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ).

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. Во многих случаях показания расходомеров суммируются во времени и используются, как и показания счетчиков, для определения количества израсходованного газа, отпущенной горячей воды или пара при проведении коммерческих расчетов или определении экономических показателей работы оборудования. Эта особенность использования расходомеров и счетчиков обусловили специфику нормирования их

метрологических характеристик. В отличие от рассмотренных средств измерений у расходомеров и счетчиков в большинстве случаев нормируется предел основной относительной погрешности, который может зависеть от величины измеряемого расхода. В связи с этим для расходомеров вводится понятие динамического диапазона, в пределах которого задан предел основной относительной погрешности и который характеризуется отношением верхнего предела измерения  $G_{в.п}$  к нижнему  $G_{н.п}$ ,  $G_{в.п}/G_{н.п}$ .

При измерении расхода в поток в большинстве случаев вводится рабочее тело, что приводит к потере давления, величина которого для приборов нормируется, так же как и необходимые длины линейных участков трубопровода до и после расходомера. Последнее требование связано с зависимостью показаний расходомеров от профиля скоростей потока в трубе.

Верхние пределы измерения расходов выбираются из ряда:  $A = a \cdot 10^n$ , где  $a$  — одно из чисел 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8;  $n$  — целое число положительное или отрицательное, включая нуль.

Существует большое разнообразие методов измерения расхода и конструктивных разновидностей расходомеров и счетчиков [23]. Наибольшее распространение получили следующие разновидности расходомеров: переменного перепада давления с сужающими устройствами; постоянного перепада давления; тахометрические; электромагнитные; ультразвуковые; вихревые; массовые. Большинство выпускаемых в настоящее время расходомеров и счетчиков являются микропроцессорными приборами с широкими функциональными возможностями. Благодаря энергонезависимой памяти, измеренные значения суточных и месячных расходов веществ хранятся в течение 1—3 лет. Эта информация может вызываться на цифровой дисплей приборов, к их цифровому выходу могут подключаться ПК и принтеры. С использованием различных интерфейсов микропроцессорные расходомеры и счетчики соединяются с локальными компьютерными сетями, при этом информация от приборов может передаваться по телефонным и радиоканалам, оптическим кабелям.

Различные варианты передачи и приема цифровой информации от расходомеров и счетчиков осуществляются с использованием устройств сопряжения — адаптеров, модемов. Некоторые типы расходомеров имеют автономное питание от батарей и аккумуляторов, что позволяет устанавливать их в местах, где отсутствует электросеть или возникают перебои с подачей электричества.

## 12.2. Основы теории измерения расхода по перепаду давления в сужающих устройствах

Данный метод измерения расхода основан на зависимости перепада давления в неподвижном сужающем устройстве (СУ), устанавливаемом в трубопроводе, от расхода измеряемой среды. Это устройство следует рассматривать как первичный преобразователь расхода. Создаваемый в сужающем устройстве перепад давления измеряется дифманометром (см. § 10.3—10.5), который может быть показывающим со шкалой в единицах расхода. При необходимости дистанционной передачи показаний дифманометр снабжается преобразователем, который линией связи соединяется с вторичным прибором и другими устройствами. Метод измерения расхода является наиболее отработанным, сужающие устройства и дифманометры для них выпускают все крупнейшие приборостроительные фирмы мира. Для измерения расхода пара, газа, жидкостей в трубопроводах диаметром свыше 300 мм в основном используется этот метод.

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 при известной градуировочной характеристике  $G = f(\Delta p)$  по перепаду давления  $\Delta p$  на сужающем устройстве, измеренному дифманометром. 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; пар является перегретым, при этом для него справедливы все положения, касающиеся измерения расхода газа;
- 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.

Сужающие устройства условно подразделяются на стандартные, специальные и нестандартные. *Стандартными* называются сужающие устройства, которые рассчитаны, изготовлены и установлены в соответствии с руководящим нормативным документом

ГОСТ 8.569.1-97 [24]. К числу *специальных* относятся стандартные диафрагмы для трубопроводов с внутренним диаметром менее 50 мм. Сужающие устройства, не относящиеся к этим двум группам, называются *нестандартными*. Градуировочная характеристика стандартных сужающих устройств определяется с помощью расчетов без индивидуальной градуировки. Этот момент обусловил широкое применение данного метода для измерения расходов воды, пара, газа в трубопроводах больших диаметров. Градуировочные характеристики нестандартных сужающих устройств определяются в результате индивидуальной градуировки.

Этому методу присущи следующие недостатки:

- узкий динамический диапазон, не превышающий трех-пяти при использовании одного дифманометра;
- диаметр трубопровода должен быть более 50 мм, в противном случае необходима индивидуальная градуировка;
- значительные длины линейных участков;
- наличие потери давления.

В качестве *стандартных* сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара используются диафрагмы, сопла и значительно реже трубы и 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. Диапазон рабочих чисел  $Re$  зависит от относительного диаметра СУ и для диафрагмы он составляет от  $10^5$  до  $10^8$ .

*Сопло* (рис. 12.1, б) имеет спрофилированную входную часть, переходящую затем в цилиндрический участок диаметром  $d$  (его значение входит в уравнения расхода). Задняя торцевая часть сопла

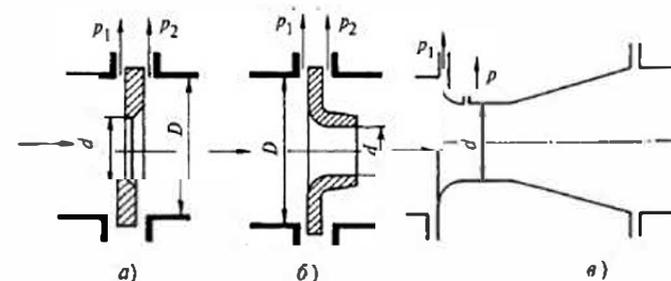


Рис. 12.1. Стандартные сужающие устройства:  
а — диафрагма; б — сопло; в — сопло Вентури

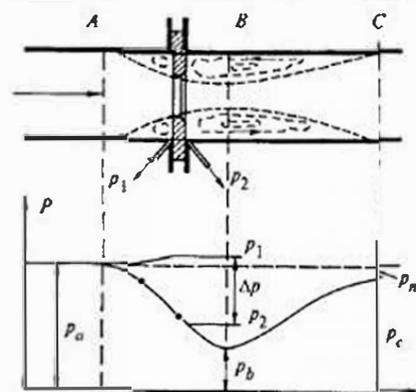


Рис. 12.2. Характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе диафрагмы

трубопровода для стандартных сопел Вентури составляет 65 мм. Их используют в диапазоне чисел  $Re$  от  $1,5 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^6$ . На рис. 12.1 символами  $p_1$  и  $p_2$  отмечены точки отбора давлений, подаваемых на дифманометр.

Рассмотрим движение потока несжимаемой жидкости через сужающее устройство на примере диафрагмы (рис. 12.2). На рисунке 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 диафрагмы. 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 до и за диафрагмой, из-за сильного вихреобразования в них. Для определения общей зависимости между расходом и перепадом давления предположим, что жидкость несжимаема (т.е. плотность жидкости не изме-

включает цилиндрическую выточку диаметром, большим  $d$ , для предохранения выходной кромки цилиндрической части сопла от повреждения. При измерении расхода стандартные сопла устанавливаются на трубопроводах диаметром не менее 50 мм, числа  $Re$  потока при этом должны составлять  $2 \cdot 10^4 \dots 10^7$ .

Сопло Вентури (контур показан на рис. 12.1, в) содержит входную часть с профилем сопла, переходящую в цилиндрическую часть, и выходной конус (может быть длинным или укороченным). Минимальный диаметр

няется при прохождении через сужающее устройство), отсутствует теплообмен с окружающей средой, трубопровод горизонтален, нет потерь на сопротивление СУ, поле скоростей равномерное.

Уравнение сохранения постоянства массового расхода (неразрывности) для несжимаемой жидкости, записанное для сечения  $A$  и на выходе диафрагмы, имеет вид:

$$\rho u_D \pi D^2 / 4 = \rho u_d \pi d^2 / 4 = G_m, \quad (12.1)$$

где  $u_D$  — начальная скорость потока в трубопроводе;  $u_d$  — скорость потока в отверстии СУ;  $\rho$  — плотность среды;  $G_m$  — массовый расход.

Записанное для этих сечений уравнение Бернулли, выражающее закон сохранения энергии для потока в трубе, имеет вид:

$$P_1 + \rho u_D^2 / 2 = P_2 + \rho u_d^2 / 2. \quad (12.2)$$

Обозначим в соответствии с ГОСТ 8569.2-97 относительный диаметр СУ через  $\beta = d/D$ , ранее квадрат этого отношения назывался относительной площадью или модулем  $m$  СУ. Используя (12.1), можно записать  $u_D = u_d \beta^2$ , тогда подставляя значение  $u_D$  в (12.2), получаем:

$$\begin{aligned} \rho u_d \pi d^2 / 4 = G_m &= 1 / (1 - \beta^4)^{0.5} \pi d^2 / 4 [2\rho(P_1 - P_2)]^{0.5} = \\ &= Ef [2\rho(P_1 - P_2)]^{0.5} \end{aligned} \quad (12.3)$$

Величина  $E = 1 / (1 - \beta^4)^{0.5}$  называется коэффициентом скорости входа,  $f$  — минимальная площадь проходного сечения СУ. Рассчитанное по выражению (12.3) значение массового расхода получается завышенным из-за завышенного перепада давления на СУ, вызванного торможением потока, завихрениями на входе и выходе СУ. В связи с этим в уравнение (12.3) вводится коэффициент истечения  $C$ , меньший единицы.

Расчет массового расхода для несжимаемых сред производится по выражению

$$G_m = CEf [2\rho(P_1 - P_2)]^{0.5} \quad (12.4)$$

объемного

$$G_0 = CEf [2/\rho(P_1 - P_2)]^{0.5} \quad (12.5)$$

ранее произведение  $CE$  называлось коэффициентом расхода  $\alpha$ .

Формулы (12.4), (12.5) справедливы для несжимаемых жидкостей. При измерении расхода газа, пара, воздуха их плотность после СУ снижается, объем увеличивается. При этом получается завышенное значение перепада, а следовательно, и расхода, для компенсации этого эффекта в формулы (11.4), (11.5) вводится коэффициент  $\epsilon$ ,

меньший единицы и называемый коэффициентом расширения. Таким образом, расчетные соотношения для массового и объемного расхода сжимаемых сред имеют вид

$$G_m = CE\epsilon f [2\rho(P_1 - P_2)]^{0,5}, \quad (12.6)$$

объемного

$$G_0 = CE\epsilon f [2/\rho(P_1 - P_2)]^{0,5}. \quad (12.7)$$

Выражения (12.6), (12.7) являются основными уравнениями расхода, пригодными для сжимаемых и несжимаемых сред, для последних  $\epsilon = 1$ . При определении по этим уравнениям расхода величины  $f$ ,  $\rho$ ,  $G_m$ ,  $G_0$  имеют соответственно следующую размерность: м<sup>2</sup>, Па, кг/м<sup>3</sup>, кг/с, м<sup>3</sup>/с. Существующие конструкции сужающих устройств обеспечивают близкое к постоянным значения коэффициента истечения только в ограниченном интервале изменения чисел Рейнольдса ( $Re = uD/\nu$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость).

Значения  $C$  и  $\epsilon$  определены в результате экспериментальных исследований, проведенных на трубопроводах с гладкой внутренней поверхностью при распределении скоростей потока по сечению трубопровода, соответствующему установившемуся турбулентному режиму течения. В экспериментах использовались диафрагмы с острой входной кромкой.

Для геометрически подобных СУ при гидродинамическом подобии потоков измеряемой среды значения  $C$  одинаковы. Геометрическое подобие СУ состоит в равенстве отношений геометрических размеров СУ к диаметру трубопровода. Гидродинамическое подобие потоков имеет место при равенстве чисел  $Re$ . Значения коэффициентов истечения определялись во многих странах мира с использованием образцовых расходомерных установок, основанных на измерении массы  $G_m$  или объема вещества  $G_0$ , протекшего через СУ за фиксированный интервал времени. Коэффициент  $C$  рассчитывается по этим данным как отношение фактического расхода к теоретическому, рассчитанному по перепаду давления на СУ

$$C = G_m(1 - \beta^4)^{0,5} / [(\pi d^2/4)(2\rho\Delta p)^{0,5}].$$

Экспериментально коэффициент расширения  $\epsilon$  определяется на сжимаемой среде как отношение коэффициентов истечения сжимаемой среды и несжимаемой при известных значениях  $C$ ,  $G_m$ ,  $\rho$ ,  $\Delta p$ ,  $d$  и  $D$

$$\epsilon = G_m(1 - \beta^4)^{0,5} / [C(\pi d^2/4)(2\rho\Delta p)^{0,5}].$$

Поскольку для расчета сужающих устройств используются компьютерные программы, то экспериментально полученные значения  $C$ ,  $\epsilon$  описаны эмпирически. Коэффициент  $C$  выражен через две составляющие:  $C = C_- K_{Re}$ . Коэффициент  $C_-$  зависит только от  $\beta$ , а  $K_{Re}$  меняется с изменением  $Re$ . Для диафрагмы с угловым отбором давления

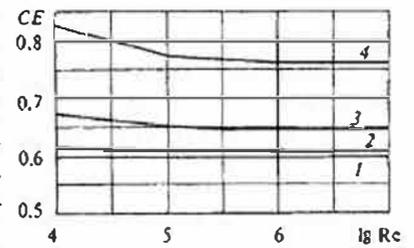


Рис. 12.3. Зависимость  $C_-$  для диафрагмы с угловым отбором от  $Re$  и  $\beta$ :  
1—4 —  $\beta = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$

$$C_- = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8, \quad (12.8)$$

$$K_{Re} = 1 + 0,0029\beta^{2,5}(10^6/Re)^{0,75}/C_-. \quad (12.9)$$

Графики зависимостей  $CE = f(Re, \beta)$  для диафрагм с угловым отбором давления, поскольку для диафрагм  $K_{Re}$  зависит от способа отбора давления представлены на рис. 12.3 и в табл. 12.1. От него зависит также величина изменений  $K_{Re}$  в области рабочих чисел  $Re$ . Если эти изменения у диафрагм с угловым отбором давления при  $\beta = 0,27...0,8$  составляют соответственно  $0,5...5\%$ , то при фланцевом отборе давления изменения составляют лишь  $0,3...2\%$ . В таких же пределах меняется  $K_{Re}$  у сопел, у сопел Вентури в рабочем диапазоне чисел  $Re$   $C$  остается постоянным.

Поправочный множитель  $\epsilon$  в общем виде зависит от  $\beta$ , показателя адиабаты  $\kappa$  и отношения  $\Delta p/p$  ( $p$  — абсолютное давление

Таблица 12.1

Таблица коэффициентов скорости входа  $E$  и истечения  $C$  для диафрагм с угловым способом отбора давления

$\beta$	$E$	$C$					
		$Re$					
		$0,5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
0,2	1,0008	0,5997	0,5986	0,5973	0,5970	0,5970	0,5970
0,3	1,0041	0,6060	0,6029	0,5992	0,5985	0,2984	0,5984
0,4	1,0130	0,6159	0,6096	0,6020	0,6006	0,6004	0,6003
0,5	1,0328	—	0,6187	0,6053	0,6030	0,6026	0,6025
0,6	1,0719	—	0,6291	0,6080	0,6043	0,6036	0,6035
0,7	1,1472	—	0,6376	0,6067	0,6012	0,6003	0,6001
0,8	1,3014	—	0,6371	0,5939	0,5862	0,5849	0,5846

среды до сужающего устройства). Расчетное соотношение для  $\epsilon$  определяется типом сужающего устройства и для диафрагмы независимо от способа отбора давления

$$\epsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4)\Delta p / (\rho\beta\omega). \quad (12.10)$$

Таким образом, между расходом и перепадом давления в сужающем устройстве существует квадратичная зависимость, что позволяет дифманометры, измеряющие перепад давления  $\Delta p = p_1 - p_2$ , градуировать в единицах расхода или получать пропорциональный расходу выходной сигнал. 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. В микропроцессорных дифманометрах помимо извлечения корня выполняется комплекс расчетных операций, связанных с учетом изменения плотности среды, коэффициента расширения и пр.

Необходимость извлечения квадратного корня является одним из недостатков метода измерения расхода по перепаду давления, обуславливающим суженный диапазон измерения расходомера, охватывающий обычно интервал 30...100 % максимального измеряемого расхода  $G_{в.н.}$ . Это означает, что использовать 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  $G_{в.н.}$ , например, до  $0,25 G_{в.н.}$  в соответствии с (12.7) перепад давления в сужающем устройстве уменьшится в 16 раз, а при расходе  $0,1 G_{в.н.}$  — 100 раз, относительная погрешность измерения перепада также увеличивается соответственно в 16 и 100 раз. Точность расходомера обычно гарантируется только в пределах шкалы 30 ... 100 %.

Реально существующая шероховатость трубопровода заостряет профиль скоростей и несколько увеличивает коэффициент истечения, 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  $\beta$ . Трубы диаметром  $D > 300$  мм имеют малую относительную шероховатость (т.е. по свойствам приближаются к гладким), поэтому для них  $K_{ш} = 1$ .

Изменение  $C$ , вызванное притуплением входной кромки диафрагмы, учитывается введением поправочного множителя  $K_{п}$  на притупление входной кромки, значение которого зависит от диаметра трубопровода и относительной площади диафрагмы. Значение  $K_{п}$  уменьшается с увеличением диаметра трубопровода и  $\beta$ . При малых  $D$  и больших значениях  $\beta$  для диафрагм произведение  $K_{ш}K_{п}$  может превышать значение 1,03, причем в процессе эксплуатации это значение изменяется. Так, при загрязнении и коррозии трубопровода изменяется значение  $K_{ш}$ , причем у диафрагм это влияние выражено сильнее, чем у сопл. Еще большие погрешности могут возникать при коррозии сужающего устройства или изменении его профиля за счет абразивных свойств среды, причем у диафрагм это также проявляется сильнее, чем у сопл. По этим причинам сужающие устройства должны изготавливаться из твердого коррозионно-стойкого материала.

Таким образом, общие уравнения расхода, учитывающие конкретные условия эксплуатации для диафрагм, имеют вид:

$$G_m = CEK_{ш}K_{п}\epsilon f[2\rho(P_1 - P_2)]^{0,5} \quad (12.11)$$

объемного

$$G = CEK_{ш}K_{п}\epsilon f[2/\rho(P_1 - P_2)]^{0,5} \quad (12.12)$$

В уравнениях расхода для сопл и труб Вентури коэффициент  $K_{п}$  отсутствует, т.е.  $K_{п} = 1$ . В показывающих дифманометрах — расходомерах и вторичных приборах, в которых отсутствуют вычислители, все величины, входящие в (12.11), (12.12), принимаются постоянными. В случае массового расхода  $k_m = CEK_{ш}K_{п}\epsilon f(2\rho)^{0,5}$  и  $G_m = k_m(P_1 - P_2)^{0,5}$ , в случае объемного  $k_0 = CEK_{ш}K_{п}\epsilon f(2/\rho)^{0,5}$  и  $G_0 = k_0(P_1 - P_2)^{0,5}$ .

В эксплуатационных условиях возможно изменение  $\rho$ , влияющее на коэффициенты  $k_m, k_0$  и градуировочную характеристику. Существенное изменение плотности среды обычно наблюдается при изменении температуры и давления газа. Если изменение плотности среды сопровождается изменением  $\epsilon$ , то в этом случае показания массового расходомера надо умножить на множитель  $c_m = \epsilon/\epsilon_{гр}(\rho/\rho_{гр})^{0,5}$ , а объемного — на множитель  $c_0 = \epsilon/\epsilon_{гр}(\rho_{гр}/\rho)^{0,5}$ , где  $\rho$  и  $\rho_{гр}$ ,  $\epsilon$  и  $\epsilon_{гр}$  действительные и градуировочные значения плотности и коэффициента расширения.

Насколько существенно влияние изменения плотности на результаты измерения, можно понять из следующего примера. Предположим, что сужающее устройство рассчитано на измерение расхода природного газа при температуре 20 °С. Действительная температура газа при неизменном давлении составляет 5 °С. Это вызывает такое изменение плотности, что поправочный множитель без учета изменения  $\epsilon$  составит

$$c_0 = (\rho_1/\rho)^{0.5} = (T/T_p)^{0.5} = (278/293)^{0.5} = 0,974.$$

т.е. изменение температуры от 20 до 5 °С может вызвать погрешность измерения расхода природного газа в 2,6 %. При значительных и частых колебаниях плотности целесообразно использование микропроцессорных дифманометров или микропроцессорных вторичных приборов, в которых при расчете расхода по уравнениям (12.11), (12.12) используются либо показания плотномеров, либо при контроле давления и температуры рассчитанные фактические значения  $\rho$  и  $\epsilon$ .

Установка СУ вызывает потерю давления  $p_n$ , которая зависит от типа сужающего устройства и  $\beta$ . При одинаковых  $\beta$  максимальные потери, определяемые уравнением  $p_n = (1 - \beta^{1,9})\Delta p$ , имеет диафрагма и минимальные труба Вентури.

### 12.3. Расчет градуировочной характеристики расходомера с сужающими устройствами

Для практического использования уравнения расхода (12.11) и (12.12) записываются в виде, зависящем от используемых единиц измерения. В одном из них:

$$\begin{aligned} G_m &= 0,01252CEK_{ш}K_n\epsilon d^2[2\rho\Delta p]^{0.5} = \\ &= 0,01252CEK_{ш}K_n\epsilon\beta^2 D^2[2\rho\Delta p]^{0.5}, \end{aligned} \quad (12.13)$$

$$\begin{aligned} G_0 &= 0,01252CEK_{ш}K_n\epsilon d^2[2/\rho\Delta p]^{0.5} = \\ &= 0,01252CEK_{ш}K_n\epsilon\beta^2 D^2[2/\rho\Delta p]^{0.5}. \end{aligned} \quad (12.14)$$

Входящие в эти выражения величины должны иметь следующие размерности:  $d, D$ , мм;  $\Delta p$ , кгс/м<sup>2</sup>;  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;  $G_m$ , кг/ч;  $G_0$ , м<sup>3</sup>/ч.

Для определения объемного расхода  $G_n$  газа в нормальном состоянии по измеренному объемному расходу  $G_0$  газа в рабочих условиях при температуре  $t$  и давлении  $p$  следует использовать

формулу  $G_n = G_0[pT_n/(p_nTK)]$ , где  $p, T$  — абсолютное давление и температура среды;  $p_n, T_n$  — те же величины, принятые за нормальные;  $K$  — коэффициент сжимаемости газа.

Расчет градуировочной характеристики расходомера с сужающим устройством предполагает вычисление численного значения  $C, E, K_{ш}, K_n, \epsilon, d, D, \rho$ , входящих в уравнения расхода (12.13) и (12.14) в рабочих условиях при известном диаметре проходного отверстия сужающего устройства  $d_{20}$  и трубы  $D_{20}$ . После установления количественного соотношения между  $G$  и  $\Delta p$  по измеренному в реальных условиях с помощью какого-либо дифманометра перепаду давлений на данном сужающем устройстве может быть вычислен расход через него.

*Коэффициент истечения.* В соответствии с теорией подобия коэффициенты истечения двух сужающих устройств равны при условии их подобия геометрического и гидродинамического потоков, в них протекающих.

Коэффициенты  $C, C_n$  и  $K_{Re}$  при  $Re > Re_{min}$  для диафрагм с угловым способом отбора определяются по формулам (12.8), (12.9). Для других способов отбора давления у диафрагмы, для сопел и труб Вентури расчетные соотношения приведены в [24].

*Коэффициенты  $K_{ш}, K_n$ .* В шероховатом трубопроводе по сравнению с гладким имеет место некоторое уменьшение проходного сечения трубопровода, увеличение  $\beta$  и снижение  $\Delta p$ , что компенсируется коэффициентом  $K_{ш} \geq 1$ . Его максимальное значение достигает 1,02 при  $D = 50$  мм и  $\beta = 0,8$ , при  $D \geq 300$  мм  $K_{ш} = 1$ . Справочные данные об эквивалентной шероховатости  $R_{ш}$  (мм) трубопроводов, изготовленных из различных материалов, приведены в [24]. Значение  $K_{ш}$  зависит также от  $Re, D, \beta$ , типа СУ и для диафрагмы в диапазоне  $10^4 < Re < 10^6$  рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} K_{ш} &= 1 + \beta^4 r_0 A_{Re} = 1 + \beta^4 [0,07 \lg(10^4 R_{ш}/D) - 0,04] \times \\ &\times [1 - (\lg Re - 6)^2/4]. \end{aligned}$$

При  $Re \geq 10^6$   $A_{Re} = 1$ . Значение  $R_{ш}$  может быть определено также экспериментально по падению давления на участке трубопровода перед СУ.

Входную кромку диафрагмы можно считать острой, если отношение радиуса закругления кромки  $r$  к диаметру отверстия диафрагмы  $d$  не превышает 0,0004. Это условие трудно выполнить при  $d < 125$  мм. Неострота входной кромки диафрагмы приводит к некото-

рому снижению перепада давления, которое компенсируется введением коэффициента  $K_{II} \geq 1$ . Этот коэффициент достигает 1,02 при  $D = 50$  мм и  $\beta = 0,2$ , при  $d \geq 125$  мм  $K_{II} = 1$ . Во время эксплуатации диафрагм радиус входной кромки возрастает. В [24] приведена зависимость изменения  $\epsilon$  от длительности эксплуатации, на которую влияет тип измеряемой среды. Эта зависимость может использоваться для установления межповерочного интервала диафрагм.

Во все приведенные выше расчетные соотношения входит значение  $Re$  потока. Практически удобнее определять число  $Re$  не по скорости, а по расходу измеряемого вещества:

$$Re = 0,354 G_0 / (Dv) = 0,0361 G_0 \rho / (D\mu);$$

$$Re = 0,354 G_m / (D\rho v) = 0,0361 G_m / (D\mu),$$

где  $G_0$  — объемный расход,  $m^3/ч$ ;  $G_m$  — массовый расход,  $кг/ч$ ;  $\rho$  — плотность среды,  $кг/м^3$ ;  $D$  — внутренний диаметр трубопровода, мм;  $\mu$  — динамическая вязкость среды,  $кгс \cdot с/м^2$ ;  $v$  — кинематическая вязкость среды,  $м^2/с$ .

Поправочный множитель на расширение измеряемой среды вводится в уравнение расхода из-за изменения плотности газа при прохождении через сужающее устройство. В общем случае  $\epsilon$  зависит от отношения  $\Delta p/p$  ( $p$  — абсолютное давление среды до сужающего устройства),  $\beta$ , типа сужающего устройства и показателя адиабаты  $\kappa$  среды:  $\epsilon = f(\Delta p/p, \beta, \kappa)$  и для диафрагмы рассчитывается по (12.10). При одинаковых  $\Delta p/p$  для диафрагм  $\epsilon$  всегда больше, чем для сопел, вследствие радиального расширения струи, приводящего к увеличению площади ее суженной части. Степень изменения плотности в основном определяется отношением  $\Delta p/p$ , при увеличении этого отношения  $\epsilon$  уменьшается,  $\Delta p/p$  у СУ не должно превышать 0,25. При малых  $\Delta p/p$  значение  $\epsilon$  близко к единице. В большинстве случаев  $\Delta p/p < 0,05$ , при этом для сопел  $\epsilon > 0,95$  и для диафрагм  $\epsilon > 0,98$ .

При изменении расхода изменяется перепад  $\Delta p$  на сужающем устройстве, а следовательно, отношение  $\Delta p/p$  и  $\epsilon$ . В микропроцессорных расходомерах  $\epsilon$  рассчитывается для измеренного перепада давления. В аналоговых приборах в уравнениях расхода (12.11) и (12.12) используется значение  $\epsilon_{ср}$ , соответствующее среднему расходу  $G_{ср}$ . При этом необходимое для определения  $\epsilon_{ср}$  отношение  $\Delta p_{ср}/p$  находится для всех дифманометров, кроме колокольных по формуле

$$\Delta p_{ср}/p = \Delta p_H/p (G_{ср}/G_{в.н})^2,$$

где  $G_{ср}$  — средний расход;  $G_{в.н}$  — верхний предел измерения расходомера;  $\Delta p_H$  — предельный номинальный перепад давления дифманометра (перепад, соответствующий расходу  $G_{в.н}$ ). Очевидно, что при таком способе определения  $\epsilon_{ср}$  при всех расходах, отличных от  $G_{ср}$ , появится дополнительная погрешность из-за отклонения действительного  $\epsilon$  от среднего. Эта погрешность зависит от отношения  $\Delta p_{ср}/p$ , причем она снижается с уменьшением отношения.

Диаметры сужающего устройства и трубопровода обычно задаются значениями при температуре  $20^\circ C$  и обозначаются соответственно  $d_{20}$  и  $D_{20}$ . Входящие в уравнения расхода диаметры при рабочей температуре  $t$  определяются по формулам  $d = d_{20} K_d$ ;  $D = D_{20} K_D$ , где  $K_d$  и  $K_D$  — поправочные множители на расширение материала сужающего устройства и трубопровода.

Поправочные множители зависят от материала и температуры среды и определяются по формулам или таблицам, приведенным в [24], исходящим из линейной зависимости расширения металла от температуры. Если температура контролируемой среды находится в интервале  $-20 \dots 60^\circ C$ , то обычно принимается  $K_D = K_d = 1$ .

Плотность измеряемой среды, входящая в уравнение расхода, определяется по параметрам состояния потока. Термопреобразователь, измеряющий температуру среды, устанавливается до или после сужающего устройства и на таком расстоянии от него, чтобы не было искажения профиля потока. Перед входом в сужающее устройство термопреобразователь устанавливается на расстоянии  $(5 \dots 20)D$  в зависимости от  $\beta$  и диаметра термопреобразователя, после — на расстоянии  $(5 \dots 10)D$ .

Согласно [24] избыточное давление среды  $p_H$  необходимо измерять непосредственно у входного торца сужающего устройства через специальное отверстие или тую, которое используется для измерения перепада давления. Абсолютное давление  $p$  среды определяется как сумма избыточного  $p_H$  и барометрического  $p_б$  давлений.

Плотность среды либо измеряется плотномером, либо определяется по измеренным температуре и давлению с использованием расчетных соотношений или таблиц, для воды и пара ГСССД 98, для смесей по компонентному составу газа ГОСТ 30319.1, жидкостей ГОСТ 28656. При отсутствии табличных данных плотность жидкости может быть определена по известной плотности  $\rho_H$  при температуре  $t_H$  в соответствии с приближенной формулой  $\rho = \rho_H [1 - \beta(t - t_H)]$ , где  $t$  — рабочая температура среды;  $\beta$  — средний коэффн-

коэффициент объемного теплового расширения жидкости в температурном интервале  $t - t_n$ .

Соотношения для расчета плотности жидкости определяют способ оценки погрешности расчета плотности.

Плотность сухого газа при температуре  $T$  и рабочем давлении  $p$  может быть определена по известной плотности  $\rho_n$  газа при нормальных условиях ( $t = 20$  °С,  $p_n = 1,0332$  кгс/см<sup>2</sup>, относительная влажность  $\phi = 0$ ) по формуле  $\rho = \rho_n p T_n / (T p_n K)$ , где  $K$  — коэффициент сжимаемости газа.

Вычисленные  $C$ ,  $K_{ш}$ ,  $K_n$ ,  $\epsilon$ ,  $\rho$  будучи подставленными в выражения (12.11) и (12.12), позволяют получить статическую характеристику расходомера, с помощью которой определяют расход по измеряемому перепаду давления. Поскольку  $C$  и  $\epsilon$  зависят от числа  $Re$ , то расчет градуировочной характеристики расходомера является итерационным.

Существуют несколько программ расчета сужающих устройств, основанных на [24].

Остановится кратко на программе «Расходомер-СТ» разработчика [24] — Казанского НИИ расходомерии. Первое меню программы содержит два пункта:

- расчет расходомера,
- данные и расчеты.

Рассмотрим последовательность работы программы «Расчет расходомера». При обращении к ней вызывается меню:

- расчет расходомера по заданному диапазону расхода;
- расчет расходомера по верхнему пределу расхода;
- расчет расхода;
- длина прямых участков трубопроводов (проверка);
- длина прямых участков трубопроводов (расчет)

Рассмотрим последовательность работы и вводимые данные для первого варианта, когда задан диапазон измеряемого расхода. После выделения этого варианта расчета открывается следующее меню:

- с определением верхнего предела дифманометра;
- с заданным верхним пределом дифманометра;
- с заданным ограничением по потере давления;
- с заданным диаметром отверстия СУ.

После выделения первого пункта меню открывается следующее:

- вода и перегретый пар;
- насыщенный пар;
- природный газ;
- воздух;
- азот;
- аргон;
- кислород;
- другая измеряемая среда.

Рассмотрим расчет по пункту «вода и перегретый пар». Выделение этого пункта приводит к появлению меню, связанного с конкретными числовыми данными:

- характеристика измеряемой среды;
- характеристика СУ и трубопровода;
- характеристика измерительного участка;
- характеристика средств измерения;
- расчет расходомера по заданным параметрам;
- сохранить введенные данные.

Выделение пункта «Характеристика измеряемой среды» приводит к открытию окна с тем же названием, с которого вводятся следующие данные:

- барометрическое давление .....
- избыточное давление .....
- температура .....
- максимальный измеряемый расход .....
- минимальный измеряемый расход .....
- предельная погрешность измерения расхода .....

В этом окне в опции «Ед. изм.» можно выбрать различные единицы измерения для каждого пункта меню. После записи данных во все позиции, они запоминаются по команде «Запомнить», окно закрывается. В окне «Характеристика СУ и трубопровода» вводятся следующие данные:

- тип СУ ... (в опции «Развернуть» предлагается выбор одного из восьми вариантов типов СУ: диафрагма с угловым, фланцевым и трехрадиусным способами отбора давления, сопла ИСА 1932, труб Вентури с обработанной и необработанной конической частью коротких и длинных, сопел Вентури коротких и длинных).

- материал СУ .....

- (только для диафрагм) предполагаемый способ определения радиуса закрутки входной кромки диафрагмы ... (визуальным или табличным методами; экспериментальным измерением)

- диаметр трубопровода .....

- материал трубопровода .....

- способ определения шероховатости стенок трубопровода ...

- (визуальным или табличным методами; экспериментальным измерением).

После ввода этих данных открывается окно «Характеристика измерительного участка», которое содержит меню: «Местное сопротивление» и «Гильза термометра». Окно «Местное сопротивление» предлагает ввод следующих данных:

Местные сопротивления до СУ

- 1-е ... (указывается тип, в опции «Развернуть» предлагается выбор одного из восемнадцати вариантов типов местных сопротивлений);

- расстояние до СУ .....

- диаметр трубопровода между 1-м и 2-м местными сопротивлениями

- 2-е ... (тип);

- расстояние между 1-м и 2-м сопротивлениями .....

- расстояние от уступа до отверстия для отбора давления ...

- высота уступа .....

- допускаемая погрешность ... (для вновь разрабатываемых СУ погрешность от сокращения длин прямых участков не должна превышать 0,5 %).

В окне «Гильза термометра» указывается

- место установки термометра (до или после СУ) . . . . .
- наружный диаметр . . . . .
- расстояние до СУ . . . . .
- внутренний диаметр расширителя (если в нем установлен термопреобразователь) . . . . .

Пункт «Характеристика средств измерений» содержит следующее меню:

- характеристика дифманометра;
- характеристика манометра;
- характеристика термометра;
- определение времени;
- характеристика вычислителя.

При обращении к пункту «Характеристика дифманометра» открывается окно «Перепад давления» и запрашивается ввод следующих величин:

- функция преобразования 1-го преобразователя ... (линейная или квадратичная, нет прибора);
- погрешность 1-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .
- функция преобразования 2-го преобразователя . . . . .
- погрешность 2-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .
- функция преобразования 3-го преобразователя . . . . .
- погрешность 3-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .
- функция преобразования планиметра . . . . .
- погрешность планиметра . . . . .

При обращении к пункту «Характеристика манометра» открывается окно «Давление» и запрашивается ввод следующих величин:

Барометрическое давление

- верхний предел измерения . . . . .
- нижний предел измерения . . . . .
- погрешность измерения барометрического давления (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .

Избыточное давление

- верхний предел измерения . . . . .
- нижний предел измерения . . . . .
- погрешность 1-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .
- погрешность 2-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .
- погрешность 3-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .
- погрешность планиметра . . . . .

(Имеются в виду три преобразователя, последовательно входящих в один канал измерения давления, а ниже — температуры).

При обращении к пункту «Характеристика термометра» открывается окно «Температура» и запрашивается ввод следующих величин:

- диапазон измерения температуры . . . . .

- нижний предел измерения температуры . . . . .
- верхний предел измерения температуры . . . . .
- погрешность 1-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .

Для первичного преобразователя, погрешность  $a$  . . . . . которого нормируется как  $a + \nu$ , погрешность  $\nu$  . . . . .

1-го устанавливается нулевой

- погрешность 2-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .
- погрешность 3-го преобразователя (систематическая) . . . . . (случайная) . . . . .

- погрешность планиметра . . . . .

При обращении к пункту «Определение времени» открывается окно «Информация» и запрашивается ввод

- погрешность интервала времени . . . . .

При обращении к пункту «Характеристика вычислителя» открывается окно под тем же названием и запрашивается ввод

- погрешность вычислителя (относительная, приведенная) . . . . .

На этом заканчивается ввод данных и при обращении к пункту «Расчет расхода» по заданным параметрам программа в итерационном режиме рассчитывает расходомер. Для удовлетворения требований по диапазону измерений и заданной погрешности программа определяет необходимость введения дополнительных дифманометров и рассчитывает их пределы измерения по перепаду давления и расходу. Для расчета погрешности расходомера необходимо после завершения расчета расходомера обратиться к опции «Погрешность». Погрешность рассчитывается для шести точек диапазона измерения, которые должен ввести пользователь по запросу программы.

## 12.4. Оценка погрешности измерения расхода

Из уравнений расхода (12.11) и (12.12) следует, что значение расхода является результатом косвенных измерений. Поэтому погрешность измерения расхода может быть определена в соответствии с выражениями (2.18) или (2.20), если известны погрешности измерения величин, входящих в уравнения расхода.

Так, среднеквадратическую погрешность измерения массового расхода  $\sigma_G$  можно определить по известным среднеквадратическим погрешностям  $\sigma_c$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $\sigma_D$ ,  $\sigma_\beta$ ,  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_{\Delta\rho h}$ , при отсутствии корреляционной зависимости между ними, используя (2.20), получаем:

$$\sigma_G = \{\sigma_c^2 + \sigma_\epsilon^2 + [2\beta^4 / (1 - \beta^4)]^2 \sigma_D^2 + [2 / (1 - \beta^4)]^2 \sigma_\beta^2 + 0,25(\sigma_\rho^2 + \sigma_{\Delta\rho h}^2)\}^{0,5} \quad (12.15)$$

Уравнение расхода содержит две группы величин, различающихся способом получения их значений. К первой группе относятся  $C$  и  $\epsilon$ , значения которых найдены в результате обработки большого числа измерений и для которых известны среднеквадратические погрешности  $\sigma_c$  и  $\sigma_\epsilon$ . Ко второй группе величин относятся  $\rho$  и  $\Delta p$ , которые определяются по результатам однократных измерений и для которых по метрологическим характеристикам средств измерений могут быть определены только предельные значения погрешностей. Для возможности использования (2.18) принимается, что для первой группы величин предельная погрешность измерений с вероятностью 0,95 равна  $2\sigma$ , тогда

$$\delta_G = \{\delta_c^2 + \delta_\epsilon^2 + [2\beta^4/(1-\beta^4)]^2 \delta_D^2 + [2/(1-\beta^4)]^2 \delta_d^2 + 0,25(\delta_{\Delta p}^2 + \delta^2)\}^{0,5} \quad (12.16)$$

В (12.16) вместо погрешности  $\delta_{\Delta p}$  измерения перепада  $\Delta p$  может использоваться  $\delta_{\sqrt{\Delta p}}$  измерения  $\sqrt{\Delta p}$ , так как часто дифманометры-расходомеры снабжаются устройством для извлечения квадратного корня из значения  $\Delta p$  в целях получения равномерной шкалы по расходу. В этом случае класс дифманометра характеризует точность измерения  $\sqrt{\Delta p}$  и

$$\delta_G = \pm \{\delta_c^2 + \delta_\epsilon^2 + [2\beta^4/(1-\beta^4)]^2 \delta_D^2 + [2/(1-\beta^4)]^2 \delta_d^2 + \delta_{\sqrt{\Delta p}}^2 + 0,25\delta_p^2\}^{0,5} \quad (12.17)$$

Погрешность  $\delta_c$  рассчитывается по формуле

$$\delta_c = \pm [\delta_{c0}^2 + \delta_L^2 + \delta_E^2 + \delta_h^2 + \delta_{ex}^2 + \delta_{ш}^2 + \delta_{\kappa}^2]^{0,5}, \quad (12.18)$$

где  $\delta_{c0}$  — погрешность расчета  $C$  при условии, что погрешности определения  $\beta$ ,  $Re$ ,  $D$  и  $R_w/D$  равны нулю,  $\delta_{ш}$  — погрешность определения поправочного множителя на шероховатость,  $\delta_{\kappa}$  — погрешность определения поправочного множителя на неостроту входной кромки диафрагмы,  $\delta_L$ ,  $\delta_E$ ,  $\delta_h$ ,  $\delta_{ex}$  — погрешности, обусловленные сокращением длины линейных участков трубопровода до и после СУ, наличием уступа величиной  $h$  перед СУ, уменьшением толщины диафрагмы по сравнению с расчетным значением и смещением оси СУ относительно оси трубопровода. Методика определения последних перечисленных погрешностей изложена в § 12.5. Данные по  $\delta_c$

и  $\delta_\epsilon$  приводятся в [24]. Для диафрагмы  $\delta_{c0} = 0,6$  при  $\beta \leq 0,6$  и  $\beta$  при  $\beta \geq 0,6$ ,  $\delta_\epsilon = \{\delta_{\epsilon 0}^2 + [(\epsilon - 1)/\epsilon]^2 \delta_{\epsilon}^2\}^{0,5}$ , где  $\delta_{\epsilon 0}$  — постоянная составляющая, которая равна  $4\Delta p/p$  при  $\beta \leq 0,75$  и  $8\Delta p/p$  при  $\beta \geq 0,75$ ,  $\delta_{\epsilon}$  — погрешность определения показателя адиабаты. Методика измерений и используемые средства для определения  $D$  и требуемая точность изготовления СУ обеспечивают  $\delta_D = \pm 0,4\%$  и  $\delta_d = \pm 0,07\%$ . При расчете количества вещества  $G_{\Sigma}$  учитывается погрешность определения интервалов времени  $\delta_\tau$  и  $\delta_{G\Sigma} = \pm (\delta_G^2 + \delta_\tau^2)^{0,5}$ .

Порядок расчета значений  $\delta_\rho$  и  $\delta_{\Delta p}$  определяется принятой методикой измерения величин  $\rho$  и  $\Delta p$ , метрологическими характеристиками применяемых средств измерений. В качестве примера рассмотрим случай, когда значение плотности определяется по таблицам с использованием измеренных значений температуры и давления среды. В этом случае предел относительной погрешности определения плотности среды в % вычисляется по формуле  $\delta_\rho = [0,25\delta_{\rho T}^2 + 10^4(1/\rho^2)(\partial\rho/\partial t)^2 \sigma_t^2 + 10^4(1/\rho^2)(\partial\rho/\partial p)^2 \sigma_p^2]^{0,5}$ , где  $\delta_{\rho T}$  — предельная относительная погрешность табличного значения плотности (равна половине единицы разряда последней цифры табличного значения, разделенной на табличное значение плотности, умноженной на 100);  $(\partial\rho/\partial t)$  и  $(\partial\rho/\partial p)$  — частные производные зависимости  $\rho = f(t, p)$  при измеренных значениях  $t$  и  $p$ . Последние определены с предельными погрешностями  $\Delta_t$  и  $\Delta_p$ , зависящими от используемых средств измерений.

Так, если комплект для измерения температуры состоит из термоэлектрического преобразователя (ТЭП), удлиняющих термоэлектродных проводов (УП) и автоматического потенциометра (АП), то при расчете  $\Delta_t$  должны быть учтены погрешности всех элементов

$\Delta_t = (\Delta_{ТЭП}^2 + \Delta_{УП}^2 + \Delta_{АП}^2)^{0,5}$  (при необходимости должна также учитываться методическая погрешность). Аналогично  $\Delta_p$  рассчитываются значения погрешности измерения давления  $\Delta_p$  и погрешности  $\Delta_{\Delta p}$ . В программе расчета «Расходомер-СТ», рассмотренной в § 12.3, пределы относительных погрешностей измерения расхода определяются для шести заданных пользователем значений относительного перепада давления на сужающем устройстве.

При определении суммарного расхода  $\Sigma G$  по показаниям расходомеров  $G_p$ , установленных в  $n$  параллельных трубопроводах, пре-

дел относительной систематической погрешности рассчитывается по формуле

$$\delta_{\Sigma G} = \left[ \sum_{i=1}^{i=n} (\delta_{G_i} G_i / \sum G_i)^2 + \delta_G^2 \right]^{0,5},$$

где  $\delta_G$  — систематическая погрешность, одинаковая для всех расходов, например погрешность определения плотности.

### 12.5. 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 [24].

При необходимости использования сужающих устройств на трубопроводах меньшего диаметра они должны подвергаться индивидуальной градуировке, т.е. экспериментальному определению зависимости  $G = f(\Delta p)$ .

В [24] даются восемь вариантов типов СУ: диафрагмы с угловым, фланцевым и трехрадиусным способами отбора давления, сопла ИСА 1932, трубы Вентури с обработанной и необработанной конической частью короткие и длинные, сопла Вентури короткие и длинные. Стандартные диафрагмы применяются при соблюдении условия  $0,2 \leq \beta \leq 0,75$ , стандартные сопла — при  $0,3 \leq \beta \leq 0,8$  и сопла Вентури — при  $0,3 \leq \beta \leq 0,75$ . Конкретный тип сужающего устройства выбирается при расчете в зависимости от условий применения, требуемой точности, допустимой потери давления.

Для соблюдения геометрического подобия СУ должны быть изготовлены в соответствии с требованиями [24], которые кратко рассмотрены применительно к наиболее распространенным сужающим устройствам — диафрагмам, изображенным на рис. 12.4. Торцы диафрагмы должны быть плоскими и параллельными друг другу. Шероховатость торца в пределах  $D$  должна быть не более  $10^{-4}d$ , выходной торец должен иметь шероховатость в пределах 0,01 мм. Если диафрагма служит для измерения расхода потока в обоих направлениях, то оба торца должны обрабатываться с шероховатостью не более  $10^{-4}d$ , коническое расширение в этом случае отсутствует и кромки с обеих сторон должны быть острыми с радиусом

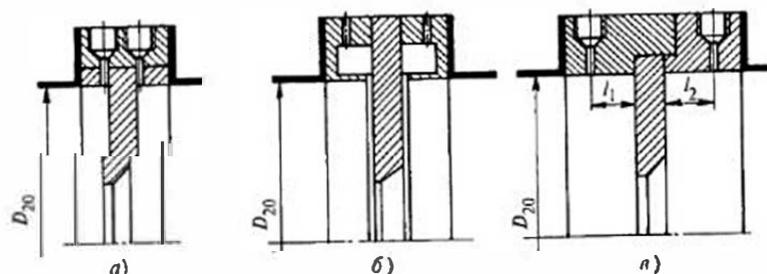


Рис. 12.4. Способы отбора давления:

а — через отдельные отверстия; б — из кольцевых камер (угловые методы); в — через отверстия во фланцах (фланцевый метод при  $l_1 = l_2 = 25,4$  мм, трехрадиусный — при  $l_1 = D$  и  $l_2 = 0,5D$ )

закругления не более 0,05 мм. Если радиус закругления не превышает  $0,0004d$ , то поправочный множитель на неостроту входной кромки принимается равным единице. При  $d \geq 125$  мм это условие выполняется. Шероховатость поверхности отверстия не должна превышать  $10^{-5}d$ .

Толщина диафрагмы  $E$  должна находиться в пределах до  $0,05D$ , толщина определяется из условия отсутствия деформации под воздействием  $\Delta p_p$  при известном пределе текучести материала. Если действительная толщина диафрагмы меньше расчетной, то к погрешности определения коэффициента истечения (12.18) добавляется погрешность  $\delta_c$ , методика расчета которой дана в [24].

Длина цилиндрической части отверстия диафрагмы должна находиться в пределах от  $0,005D$  до  $0,02D$ , если толщина превышает последнюю цифру, то со стороны выходного торца делается коническая поверхность с углом конусности  $45 \pm 15^\circ$ .

Отбор давлений  $p_1$  и  $p_2$  при угловом способе осуществляется либо через отдельные цилиндрические отверстия (рис. 12.4, а), либо из двух кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полостью трубопровода кольцевой шелью 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 возмущенных потоков, так как кольцевые камеры обеспечивают выравнивание давления по окружности трубы, что позволяет более точно измерять перепад давления при сокращенных прямых участках трубопровода.

При фланцевом и трехрадиусном способах отбора давления перепад измеряется через отдельные цилиндрические отверстия, расположенные на расстоянии в первом случае  $l_1 = l_2 = 25,4$  мм, а во втором  $l_1 = D$  и  $l_2 = 0,5D$  от плоскостей диафрагмы (рис. 12.4, в). Коэффициент истечения  $C$  зависит от способа отбора давления.

При установке сужающих устройств необходимо соблюдать ряд условий, влияющих на погрешность измерений.

Сужающее устройство в трубопроводе должно располагаться перпендикулярно оси трубопровода. Для диафрагм 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  $0,0025D/(0,1 + 2,3\beta^4)$ . Если смещение оси превышает указанное значение, но менее  $0,005D/(0,1 + 2,3\beta^4)$ , то к погрешности коэффициента истечения в (12.18) прибавляют  $\delta_{\text{ск}} = 0,3\%$ . Если смещение оси превышает указанное предельное значение, то установка СУ не допускается.

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. Трубопровод считается цилиндрическим, если отклонение диаметра не превышает  $\pm 0,003D$  от его среднего значения. В противном случае, если на расстоянии  $l_h$  до СУ высота уступа  $h$  удовлетворяет двум условиям  $h/D \leq 0,002(l_h/D + 0,4)/(1,1 + 2,3\beta^4)$  и  $h/D \leq 0,005$ , то к погрешности коэффициента истечения прибавляют  $\delta_h = 0,2\%$ .

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 исказить гидродинамику потока на входе или выходе сужающего устройства. Длина этих участков должна быть такой, чтобы искажения потока, вносимые коленами, вентилями, тройниками, 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

Таблица 12.2

Наименьшие относительные длины линейного участка до диафрагмы

№	Наименование местного сопротивления	Коэффициенты			$\beta$							
		$a_k$	$b_k$	$c_k$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8
1	Задвижка, равнопроходный шаровой кран	11,5	82	6,7	12	12	12	13	15	19	24	30
2	Пробковый кран	14,5	30,5	2,0	16	18	20	23	26	30	32	34
3	Запорный кран, вентиль	17,5	64,5	4,1	18	18	19	22	26	33	38	44
4	Заслонка	21,0	38,5	1,4	25	29	32	36	40	45	47	50
5	Конфузор	5,0	114	6,8	5	5	6	6	9	16	22	30
6	Симметричное резкое сужение	30,0	0,0	0,0	30	30	30	30	30	30	30	30
7	Диффузор	16,0	185	7,2	16	16	17	18	21	31	40	54
8	Симметричное резкое расширение	47,5	54,5	1,8	51	54	58	64	70	77	80	84
9	Одиночное колесо	10,0	113	5,2	10	11	11	14	18	28	36	46

и вентили, особенно регулирующие, рекомендуется устанавливать после СУ. Длина  $L_k$  прямого участка перед сужающим устройством зависит от относительного диаметра  $\beta$ , диаметра трубопровода  $D$  и вида местного сопротивления, расположенного до прямого участка,  $L_{k1}/D = a_k + b_k\beta^{c_k}$ , где  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$  — постоянные коэффициенты, зависящие от вида местного сопротивления. Их величина и наименьшие значения  $L_{k1}/D$  для девяти типов местных сопротивлений приведены в табл. 12.2.

Так, для вида местного сопротивления «Задвижка, полнопроходной шаровой кран» при  $\beta = 0,2$ ,  $L_1/D = 12$ , при  $\beta = 0,8$ ,  $L_1/D = 30$ . Длина прямого участка  $L_2$  после сужающего устройства зависит только от числа  $\beta$ ,  $L_2/D = 8,55\beta^{0,55}$ . Для  $\beta = 0,2$ ,  $L_2 = 4D$  и при  $\beta = 0,8$ ,  $L_2/D = 8$ . Допускается уменьшение длины прямых участков перед СУ до величины, вызывающей дополнительную погрешность  $\delta_L$ , которая не превысит  $\pm 1\%$ . Погрешность суммируется со значением  $\delta_{\text{с0}}$  и рассчитывается по формуле  $\delta_L = [0,8 + 19,2(L_1/L_{k1})^4]^{-1}$ , где  $L_1/L_{k1}$  отношение действительной длины прямого участка к расчетной. Погрешность в  $\pm 1\%$  соответствует  $L_1/L_{k1} = 3$ .

Допускается сокращение длины линейного участка после СУ вдвое, но при этом дополнительная погрешность к коэффициенту истечения составит  $\pm 0,5\%$ .

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.

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 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 следует располагать 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 попадание в соединительные линии и дифманометр газа, который может выделиться из протекающей жидкости (рис. 12.5, а). Для горизон-

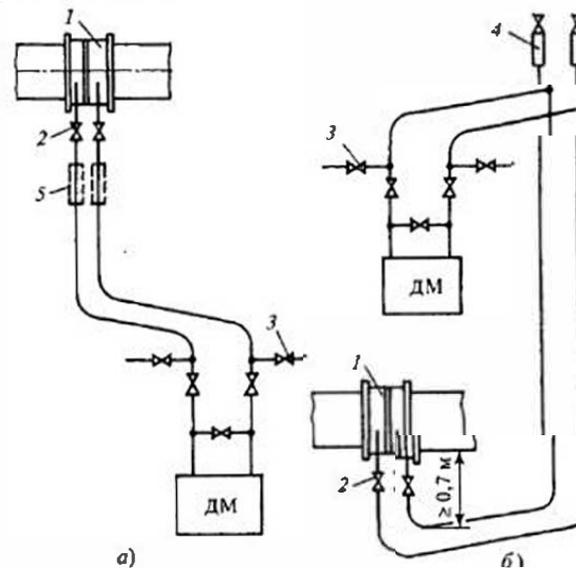


Рис. 12.5. Схема соединительных линий при измерении расхода жидкости с установкой дифманометра ниже (а) и выше (б) сужающего устройства:

1 — сужающее устройство; 2 — запорные вентили; 3 — продувочный вентиль; 4 — газосборники; 5 — разделительные сосуды

тальных 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. Продувка соединительных линий осуществляется через вентили 3.

При измерении расхода агрессивных сред в соединительных линиях возможно ближе к сужающему устройству устанавливаются *разделительные сосуды 5*. Соединительные линии между разделительным сосудом и дифманометром, частично и сам сосуд заполнены нейтральной жидкостью, плотность которой больше плотности измеряемой агрессивной среды. Остальная часть сосуда и линии до сужающего устройства заполнены контролируемой средой. Следовательно, поверхность раздела контролируемой среды и разделительной жидкости 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, 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 желательнее производить вертикально. Если вертикальная прокладка соединительных линий невозможна, то их следует прокладывать с наклоном в сторону трубопровода или конденсатосборников 4. 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.

При измерении расхода перегретого водяного пара неизолированные соединительные линии оказываются заполненными конденсатом. 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 *уравнительные конденсационные сосуды*. Назначение уравнительных сосудов можно пояснить с помощью рис. 12.7. Предположим, что при отсутствии уравнительных сосудов и некотором расходе пара уровень конденсата в обеих импульсных трубках одинаков. При увеличении расхода на сужающем устройстве увеличивается

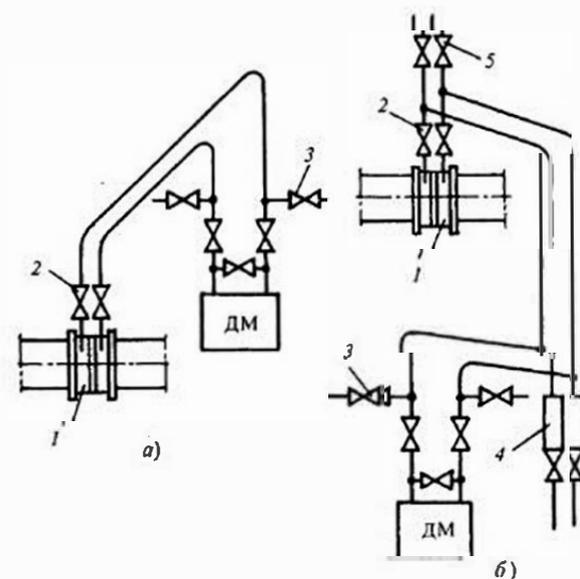


Рис. 12.6. Схема соединительных линий при измерении расхода газа с установкой дифманометра выше (а) и ниже (б) сужающего устройства:

1 — сужающее устройство; 2 — запорные вентили; 3 — продувочный вентиль; 4 — конденсатосборник

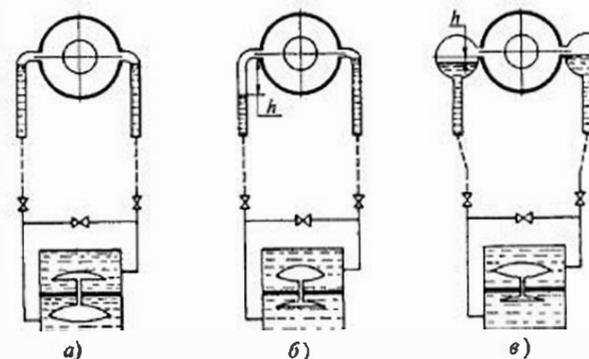


Рис. 12.7. Схема, поясняющая назначение уравнительных конденсационных сосудов при измерении расхода пара:  
а-в — стадии измерения разности давлений

перепад давления, 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 величину  $h$ . 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  $h\rho g$ , уменьшающий перепад 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 изменений расхода.

Очевидно, что погрешность можно снизить уменьшением  $h$ . Для этого на концах импульсных трубок устанавливают уравнительные конденсационные сосуды (рис. 12.8) — горизонтально расположен-

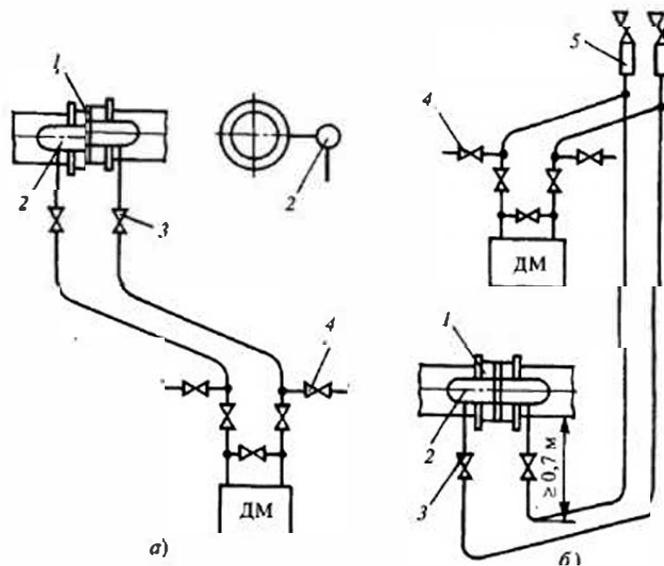


Рис. 12.8. Схема соединительных линий при измерении расхода пара с установкой дифманометра ниже (а) и выше (б) сужающего устройства:

1 — сужающее устройство; 2 — уравнительные сосуды; 3, 4 — запорные и продувочные вентили; 5 — газосборник

ные цилиндры большого сечения. 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 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 — запорные и продувочные вентили.

## 12.6. Специальные сужающие устройства

Эти устройства используются для измерения расхода методом переменного перепада давления без индивидуальной градуировки, если их расчет, изготовление и установка выполнены в соответствии с методическими указаниями РД 50-411. К специальным сужающим устройствам (ССУ) относятся диафрагмы с коническим входом, цилиндрические сопла, сопла «четверть круга», двойные диафрагмы, сегментные и износостойчивые диафрагмы, стандартные диафрагмы с внутренним диаметром менее 50 мм, все они представлены соответственно на рис. 12.9, а—ж. При использовании ССУ должны выполняться те же условия, что и для обычных стандартных сужающих устройств (§ 12.2). Специальные сужающие устройства допускаются к применению только в той области чисел Рейнольдса, где коэффициент расхода  $\alpha$  можно считать не зависящим от расхода. Эти границы  $Re_{min}$  и  $Re_{max}$  зависят от типа ССУ и его относительной площади  $m = \beta^2$ .

Диафрагмы с коническим входом используются на трубопроводах диаметром  $D$  от 12,5 до 100 мм, при этом относительная площадь  $m$  составляет 0,01...0,25 и диаметр отверстия диафрагмы 6...50 мм. Значение  $Re_{min}$  изменяется от 40 (при  $m = 0,01$ ) до 250 (при  $m = 0,25$ ). В свою очередь,  $Re_{max}$  изменяется от 20 000 (при  $m = 0,01$ ) до 50 000 (при  $m = 0,25$ ).

Цилиндрические сопла используются для  $D = 25...100$  мм при  $m = 0,01...0,49$  и  $d = 2,5...70$  мм;  $Re_{min}$  изменяется от 500 (при  $m = 0,01$ ) до 5500 (при  $m = 0,49$ ) соответственно  $Re_{max} = 8000...200\,000$ .

Сопла «четверть круга» могут иметь различные конструктивные исполнения, на рис. 12.9 показано одно из них. У всех исполнений профиль сужающей части описывается дугой определенного радиуса  $r$ .

Такие ССУ используются для  $D = 25 \dots 100$  мм при  $m = 0,05 \dots 0,49$  и  $d = 6 \dots 70$  мм;  $Re_{\min}$  изменяется от 2000 (при  $m = 0,05$ ) до 5000 (при  $m = 0,49$ ) соответственно  $Re_{\max} = 35\,000 \dots 200\,000$ .

Двойные диафрагмы состоят из двух диафрагм, удаленных друг от друга. У первой по ходу потока диафрагмы  $m_1$  больше относительной площади второй диафрагмы  $m$ , причем связь между  $m_1$  и  $m$  должна быть определенной. Перепад давления измеряется у передней плоскости первой диафрагмы и задней плоскости второй. Такой тип ССУ используется для  $D = 40 \dots 100$  мм при  $m = 0,1 \dots 0,5$  и  $d = 12,7 \dots 70,5$  мм;  $Re_{\min}$  изменяется от 2500 (при  $m = 0,1$ ) до 15 000 (при  $m = 0,50$ ) соответственно  $Re_{\max} = 150\,000 \dots 400\,000$ .

Сегментные диафрагмы обычно используются для измерения расхода загрязненных сред или жидкостей, из которых могут выделяться газы. В первом случае отверстие диафрагмы располагается в нижней части трубы, а во втором — в верхней. Они используются для  $D = 50 \dots 1000$  мм при  $m = 0,1 \dots 0,50$

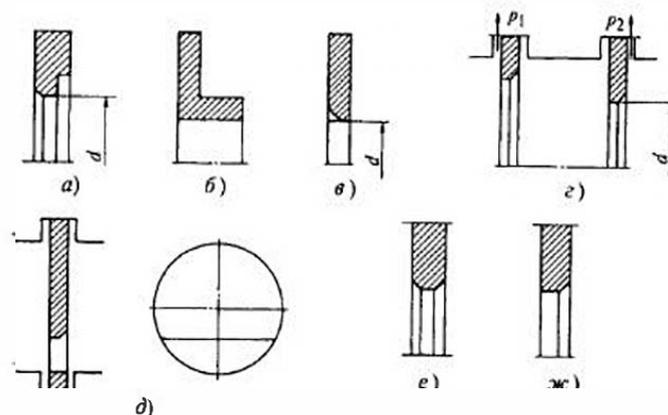


Рис. 12.9. Специальные сужающие устройства:

а — диафрагма с коническим входом; б — цилиндрическое сопло; в — сопло четверть круга; г — двойная диафрагма; д — сегментная диафрагма; е — износостойчивая диафрагма; ж — диафрагма для  $D < 50$  мм

Износостойчивые диафрагмы (стандартные диафрагмы со снятой фаской по входной кромке) используются для  $D = 30 \dots 1000$  мм при  $m = \beta^2 = 0,05 \dots 0,64$  и  $d = 16 \dots 800$  мм при этом  $Re_{\min} = 20\,000 \dots 300\,000$ , при всех  $m$  значение  $Re_{\max} = 10^7$ .

Стандартные диафрагмы для трубопроводов с внутренним диаметром менее 50 мм используются для  $D = 14 \dots 50$  мм при  $m = \beta^2 = 0,05 \dots 0,64$  и  $d = 7 \dots 40$  мм, при этом  $Re_{\min} = 2200 \dots 300\,000$ , при всех  $m$  значение  $Re_{\max} = 10^7$ .

Диафрагмы с входным конусом, сопла «четверть круга», двойные диафрагмы, цилиндрические сопла рекомендуются для измерения расхода веществ при малых числах  $Re$ , что имеет практическое значение в случаях установки сужающих устройств в трубопроводах малого диаметра, измерения расхода вязких жидкостей и горячих газов.

Сегментные диафрагмы используются для измерения расхода загрязненных жидкостей и газов, в которых объемное относительное содержание жидкой и твердой фазы не должно превышать соответственно  $0,4 \rho/\rho_n$  и  $\rho/\rho_n$ , где  $\rho$  и  $\rho_n$  — плотности смеси и примеси.

Износостойчивые диафрагмы рекомендуется применять взамен обычных стандартных диафрагм. Это объясняется тем, что у последних острая входная кромка неизбежно притупляется под действием потока, что приводит к росту погрешности измерения расхода. В то же время износостойчивые диафрагмы длительное время сохраняют свой профиль неизменным.

Стандартные диафрагмы для трубопроводов с внутренним диаметром менее 50 мм рекомендуются для измерения малых расходов газа (менее  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и малых расходов жидкостей (менее  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), обладающих кинематической вязкостью менее  $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

При изготовлении специальных сужающих устройств высокие требования предъявляются к шероховатости их проточной части. Кроме того, ССУ допускаются к применению только на гладких трубопроводах, к числу которых относятся трубопроводы с заданной относительной шероховатостью на участке  $10D$  до ССУ. До и после ССУ должны быть прямые участки трубопровода, длина которых зависит от  $\beta$ , ССУ и типа местного сопротивления. Регулирующую аппаратуру необходимо устанавливать за ССУ. Перепад давления может измеряться любым из способов, представленных на рис. 12.4.

## Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте область применения расходомеров переменного перепада давления, достоинства и недостатки этого метода измерения расхода.
2. Какие типы сужающих устройств вы знаете?
3. Какие величины определяют геометрическое и гидродинамическое подобие сужающих устройств при определении коэффициента истечения?
4. Каков характер зависимости  $CE$  от  $Re$  и  $\beta$ ?
5. Охарактеризуйте коэффициенты, уточняющие  $C$  и учитывающие реальные условия работы  $CU$ ?
6. Какие вы знаете способы отбора давления у диафрагм?
7. Какие составляющие определяют погрешность измерения расходомеров переменного перепада давления?
8. Рассмотрите требования, предъявляемые к установке дифманометров при измерении расхода жидкостей и газов.
9. Для чего вводятся уравнительные конденсационные сосуды при измерении расхода пара?
10. Какие специальные сужающие устройства вы знаете и каково их назначение?

Глава тринадцатая  
**РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА  
 ДАВЛЕНИЯ, ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ  
 И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ**

## 13.1. Ротаметры

Наиболее распространенными представителями расходомеров постоянного перепада являются ротаметры. Ротаметры используются в промышленных и лабораторных условиях для измерения небольших объемных расходов жидкостей (верхние пределы от 0,002 до 70 м<sup>3</sup>/ч) или газов (верхние пределы от 0,05 до 600 м<sup>3</sup>/ч) в вертикальных трубопроводах диаметром 3...150 мм.

Ротаметры обладают рядом достоинств: простота устройства; возможность измерения малых расходов однофазных жидкостей и газов в трубопроводах малых диаметров; высокая точность при индивидуальной градуировке прибора; малая потеря давления; практически равномерная шкала; динамический диапазон  $G_{в.п.}/G_{н.п.}$  достигает десяти.

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.

В простейшем виде ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку 1 (рис. 13.1), внутри которой располагается поплавок 2. Поплавки могут иметь различную форму. Одна из форм — 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  $f_k$ , при прохожде-

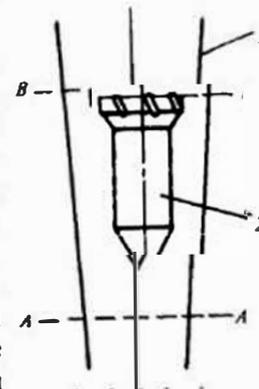


Рис. 13.1. Схема ротаметра:  
 1 — стеклянная трубка;  
 2 — поплавок

нии через который поток сужается, скорость его растет, и 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 поплавка площадь  $f_k$  увеличивается. 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, находящийся в среде плотностью  $\rho$ . На поплавок, имеющий объем  $V$ , наибольшее сечение  $f$ , среднюю плотность  $\rho_n$ , сверху вниз действует сила тяжести

$$P_n = V(\rho_n - \rho)g.$$

Снизу вверх на поплавок действуют:

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  $W = \varphi(\rho u^2/2)f$ , где  $\varphi$  — коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от его формы;  $\rho$  — плотность среды;  $u$  — ее скорость в сечении  $AA$ ;

3) сила трения потока о боковую поверхность поплавка  $N = k u_k^n f_b$ ,  $k$  — коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса и степени шероховатости поплавка;  $u_k$  — средняя скорость потока в кольцевом зазоре;  $n$  — показатель степени, зависящий от скорости;  $f_b$  — площадь боковой поверхности поплавка.

Поплавок будет висеть в потоке жидкости или газа, если соблюдается равенство сил, действующих на него сверху и снизу:

$$P_n = (p_1 - p_2)f + W + N.$$

Отсюда можно получить уравнение

$$p_1 - p_2 = (P_n - W - N)/f.$$

Силы  $W$  и  $N$  обычно малы, и если ими пренебречь, то можно записать

$$p_1 - p_2 = G/f. \quad (13.1)$$

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 (13.1).

Предположим, что при исходном расходе  $G_0$  поплавок занимает исходное положение, характеризующееся площадью кольцевого зазора  $f_k$ . При этом на поплавок действует перепад  $p_1 - p_2$ , при котором выполняется равенство (13.1). При увеличении расхода в первый момент положение поплавка и  $f_k$  неизменны, в силу чего  $u$  и  $p_1 - p_2$  начнут увеличиваться. При этом нарушается равенство (13.1), поплавок начнет подниматься вверх и  $f_k$  будет увеличиваться (из-за конусного профиля трубки), что приведет к уменьшению  $u$  в кольцевом зазоре и  $p_1 - p_2$ . Поплавок будет подниматься до тех пор, пока вновь не восстановится равенство (13.1). Очевидно, что любому расходу будет соответствовать определенная площадь  $f_k$  кольцевого зазора, т.е. определенное положение поплавка. Уравнение, связывающее  $G_0$  и  $f_k$ , обычно записывается в виде, аналогичном уравнению расхода для расходомеров переменного перепада:

$$G_0 = \alpha f_k [2/\rho(p_1 - p_2)]^{0.5}.$$

С учетом (13.1)

$$G_0 = \alpha f_k [2gV(\rho_n - \rho)/(\rho f)]^{0.5}. \quad (13.2)$$

Из (13.2) следует, что при  $\alpha = \text{const}$  существует линейная зависимость между  $G_0$  и  $f_k$ . Однако при конической форме трубки линейной зависимости между  $G_0$  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 (13.2) следует также, что положение поплавка зависит не только от расхода, но и от плотности контролируемой среды, т.е. градуировка ротаметра должна производиться с ее учетом. 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 плотность измеряемой  $\rho$  и градуировочной  $\rho_{гр}$  сред близки, то

$$k = \{\rho_{гр}(\rho_n - \rho)/[\rho(\rho_n - \rho_{гр})]\}^{0.5}.$$

Обычно для газов  $\rho_n \gg \rho$ , и в этом случае  $k = (\rho_{гр}/\rho)^{0,5}$ . Переградировка ротаметра на другой диапазон измерения в соответствии с (13.2) может быть осуществлена изменением  $\rho_n$ , например в результате изготовления поплавка из другого материала или пустотелым.

Погрешность измерения расхода ротаметром может быть определена через погрешности величин, входящих в формулу (13.2). 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 расчетной. Эти погрешности имеют достаточно большие значения, причем некоторые из них возрастают к началу шкалы.

Основная погрешность ротаметров обычно равна  $\pm(2...3)\%$ , при индивидуальной градуировке она может быть уменьшена до  $\pm(0,5...1)\%$ . Обычно нижний предел измеряемого расхода ротаметра  $G_{н.п.}$  составляет 0,1 от верхнего предела  $G_{в.п.}$ . Важным отличием ротаметров от других типов расходомеров является незначительная и почти постоянная в рабочем диапазоне потеря давления. У стандартных расходомеров она не превышает 10 кПа для жидкостных приборов и 5 кПа для газовых.

Ротаметры выпускаются нескольких типов. Стекланные показывающие ротаметры типа РМ имеют шкалу, нанесенную на наружную поверхность конической стеклянной трубки. Шкалы могут градуироваться в различных единицах: в единицах расхода, в процентах от максимального деления, в миллиметрах, в долях отношений диаметра трубки к диаметру поплавка. Очевидно, что в последних случаях ротаметр снабжается градуировочной характеристикой.

Показания считываются по положению верхней горизонтальной плоскости поплавка. Ротаметры со стеклянной конической 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 с 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 передачи показаний. Основная приведенная погрешность ротаметров с дифференциально-трансформаторным преобразователем в комплекте с вторичным прибором составляет  $\pm 2,5\%$ , с пневматическим выходным сигналом  $\pm(1,5...2,5)\%$ .

В зависимости от диапазона измерения, плотности и агрессивности среды поплавки изготавливаются из нержавеющей стали, титана, алюминиевых сплавов, пластмассы, фторопласта.

Ротаметры с конической стеклянной трубкой типа РМ выпускаются фирмой «Промприбор» (г. Ливны), с дистанционной передачей Арзамасским приборостроительным заводом. Широкая гамма ротаметров производится фирмами Brooks Instrument, Siemens и др.

### 13.2. Тахометрические счетчики и расходомеры

*Тахометрическими* называются расходомеры, в которых скорость движения рабочего тела пропорциональна объемному расходу измеряемой среды. В большинстве случаев рабочее тело — преобразователь расхода (крыльчатка, турбинка, шарик и т.п.) — под воздействием потока вращается. В зависимости от устройства рабочего тела тахометрические расходомеры подразделяются на крыльчатые, турбинные, шариковые, камерные, кольцевые и др.

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 вторичным прибором. 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 должны снабжаться либо измерителями температуры и давления, либо плотномерами, вычислительными устройствами.

Тахометрические расходомеры применяются для измерения расхода различных жидкостей (реже газов), причем некоторые их разновидности могут использоваться на загрязненных жидкостях. Наиболее широко эти расходомеры используются в коммунальном хозяйстве для учета индивидуального потребления горячей и холодной воды, газа.

Тахометрические расходомеры обладают следующими положительными чертами: широкий динамический диапазон, достигающий 25; высокая точность, получаемая за счет индивидуальной градуировки приборов; простота получения и съема показаний. К числу их

недостатков относятся значительная потеря давления, требования к длинам линейных участков до (свыше  $10D$ ) и после (более  $3D$ ) счетчика, износ подшипников при наличии загрязнений в воде и газах, ограничения по диаметру трубопровода.

В соответствии с ГОСТ 14167-83 в технической документации водосчетчиков указывается четыре значения объемного расхода: максимальный  $G_{o,max}$ , на котором допускается кратковременная работа счетчика и для которого определяется потеря давления; эксплуатационный  $G_{o,э} = (24...46) \%$  от  $G_{o,max}$ , при котором рекомендуется длительная работа счетчика; переходной  $G_{o,пер}$  и минимальный  $G_{o,min}$ . В диапазоне  $G_{o,пер} - G_{o,max}$  счетчик имеет минимальный предел относительной погрешности, составляющей, например  $\pm 2 \%$ , в области  $G_{o,min} - G_{o,пер}$  нормируется большее значение погрешности, достигающее, например  $\pm 4 \%$ .

Тахометрические расходомеры разных типов: для горячей и холодной воды, нефтепродуктов, газа выпускаются многими отечественными и зарубежными фирмами и заводами: з-дом «Водоприбор», «Ценнер водоприбор», «Тепловономер», «Саяны» (Москва), «Промприбор» (г. Ливны), Арзамасским приборостроительным заводом, «Промприбор» (г. Ивано-Франковск), концерном АВВ, фирмами Siemens, Invensys Metering Systems, Brooks Instrument и др.

*Крыльчатые и турбинные расходомеры* применяются для измерения расхода различных жидкостей за исключением очень вязких и загрязненных, поскольку для них важной является смазывающая способность измеряемой среды. Для измерения расхода газа турбинные расходомеры применяются реже. Это связано с тем, что из-за малой плотности газа достаточно большой вращающий момент получается только при больших расходах, что уменьшает диапазон измерения расходомера и повышает порог чувствительности. Кроме того, в газовой среде ускоряется износ подшипников.

При диаметрах трубопроводов от 15 до 40 мм применяются крыльчатые расходомеры, а от 50 до 250 мм — турбинные. 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 осью, на которой расположена турбинка 4. В расходомерах частота вращения турбинки, пропорциональная объемному расходу, с помощью тахометрического преобразователя 5 преобразуется в частоту импульсов выходного сигнала. При известной цене

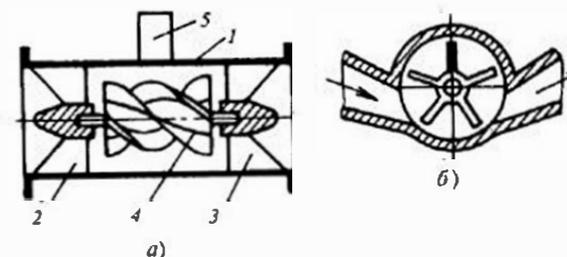


Рис. 13.2. Устройство турбинных преобразователей расхода: а — четырехлопастная турбина; б — турбина одноструйных водосчетчиков; 1 — корпус; 2, 3 — струевыпрямители; 4 — турбинка; 5 — тахометрический преобразователь

импульса их суммарное число определяет объемный расход на интервале времени. Импульсный сигнал с помощью специальной схемы преобразуется в аналоговый выходной сигнал. В счетчиках количества число оборотов турбины, пропорциональное количеству протекшего вещества, измеряется счетным механизмом, соединенным с осью турбинки шестеренчатым редуктором и магнитной муфтой. Если редуктор находится в воде, то счетчик называется мокроходным, если редуктор вынесен из воды, то счетчик является сухоходным. В основном используются последние. Счетчики могут давать импульсный сигнал, пропорциональный числу оборотов, для чего на стрелке отсчетного устройства устанавливается постоянный магнит, который вызывает срабатывание герконового реле. Цена импульса зависит от того, на стрелке какой декады счетчика установлен магнит.

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 (рис. 13.2, а). При малом диаметре турбинок число лопастей мало (4—6), но они имеют большую длину. При больших диаметрах турбинки 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  $G_0$ . 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 (см. рис. 13.2, а поз. 5) или механического счетчика, конструктивные параметры турбинки.

С увеличением вязкости и снижением числа  $Re$  коэффициент преобразования  $\omega/G_0$  турбинного преобразователя уменьшается. Зависимость показаний турбинных расходомеров от вязкости контролируемой среды является их существенным недостатком. Влияние момента сопротивления  $M_c$  наиболее сильно проявляется при уменьшении измеряемых расходов, так как вращающий момент снижается в большей степени, чем  $M_c$ . Это обстоятельство сужает диапазон измерения и обуславливает большую погрешность измерения на начальном участке диапазона.

В расходомерах для возможности бесконтактного измерения скорости вращения турбинки ее лопасти либо изготавливаются из ферромагнитного материала, либо на крыльчатке устанавливаются метки из этого материала. Среди бесконтактных преобразователей (см. рис. 13.2, а поз. 5), преобразующих скорость вращения турбинки в электрический сигнал, наибольшее распространение получили магнитоиндукционные типы. Такой преобразователь (рис. 13.3, а) представляет собой катушку 1 с большим числом витков, внутри которой

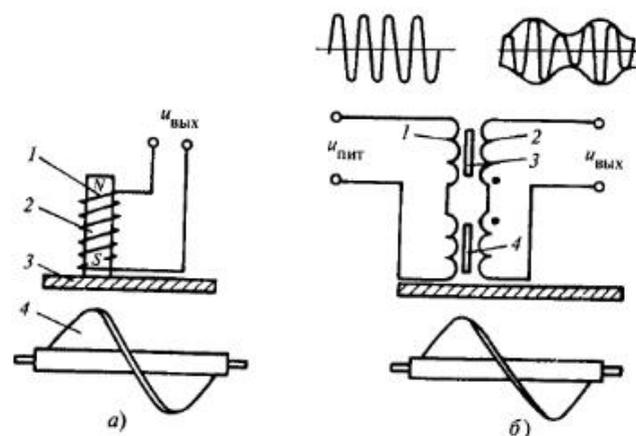


Рис. 13.3. Схема электрических бесконтактных преобразователей турбинных расходомеров:

а — магнитоиндукционного: 1 — катушка; 2 — магнит; 3 — немагнитная труба; 4 — ферромагнитные лопасти; б — дифференциально-трансформаторного; 1, 2 — первичная и вторичная обмотки; 3 — подвижный сердечник; 4 — сердечник

вставлен магнит 2. Оси катушки и магнита располагаются перпендикулярно к оси немагнитной трубы 3. При прохождении ферромагнитной лопасти 4 турбинки (или метки) мимо магнита происходит изменение магнитного поля, что вызывает появление импульса ЭДС (меандра) в обмотке. Очевидно, что частота следования этих импульсов будет равна числу оборотов турбинки, умноженному на число лопастей. Частотно-импульсный сигнал по линиям связи поступает на вход измерительного блока, преобразующего этот сигнал в токовый, изменяющийся пропорционально расходу. Магнитоиндукционные преобразователи используются в расходомерах с турбинками больших диаметров, имеющих значительный крутящий момент. Это связано с тем, что такие преобразователи создают большой тормозящий момент.

Расходомеры малых расходов (см. рис. 13.3, б) оснащаются дифференциально-трансформаторными преобразователями, тормозящий момент которых значительно меньше, чем у магнитоиндукционных. Дифференциально-трансформаторный преобразователь состоит из первичной обмотки 1, питаемой от генератора напряжением с частотой 3...6 кГц, двух встречно включенных секций вторичной обмотки 2 и двух сердечников 3 и 4. При отсутствии лопасти турбинки под сердечником 4 ЭДС, наводимые в обеих секциях должны быть равными, при этом  $U_{\text{вых}} = 0$ . Если присутствует начальный небаланс, то он устраняется с помощью подвижного сердечника 3.

При прохождении лопасти турбинки под сердечником 4 нарушается равенство магнитных потоков в секциях вторичной обмотки (увеличивается поток в нижней обмотке и уменьшается в верхней), в силу чего на выходе вторичной обмотки появляется сигнал  $U_{\text{вых}}$ . Этот сигнал имеет частоту питающего напряжения, модулированного по амплитуде частотой, равной частоте вращения турбинки, умноженной на число лопастей. Измерительный преобразователь, на вход которого поступает  $U_{\text{вых}}$ , выделяет частоту модуляции и преобразует ее в выходной токовый сигнал. Серийно выпускаются турбинные расходомеры для измерения расхода воды от 0,07 до 500 м<sup>3</sup>/ч в трубопроводах диаметром от 20 до 150 мм при температурах среды до 120 °С и давлении до 1,6 МПа с пределом основной относительной погрешности  $\pm(2...5)\%$ . Расходомеры газа выпускаются с верхними пределами от 100 до 1600 м<sup>3</sup>/ч при диаметрах 65...200 мм, температуре газа до 50 °С и давлении до 0,6 МПа. Достоинством турбинных расходомеров является возможность их использования в широком интервале расходов, диаметров трубопроводов и параметров кон-

тролируемой среды. У отдельных типов расходомеров при больших скоростях и диаметрах труб динамический диапазон измерения достигает 15...20. Такие расходомеры имеют малую инерционность.

В настоящее время турбинные тахометрические расходомеры являются одними из наиболее точных. Существуют серийно выпускаемые расходомеры с основной погрешностью 0,5%, которая может быть уменьшена индивидуальной градуировкой.

Однако тахометрические турбинные расходомеры имеют и недостатки, 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 служит 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. 13.4, а. Поток жидкости, закрученный формирователем 1 в винтовом направлении, вызывает движение шарика 2 по окружности. От перемещения вдоль трубы шарик удерживается ограничительным 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.

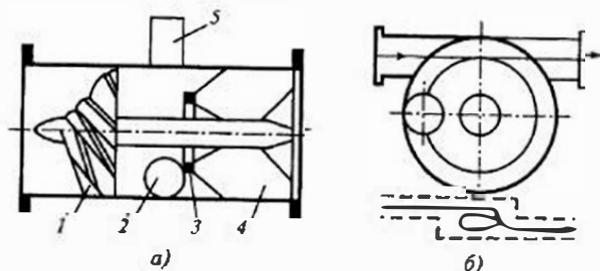


Рис. 13.4. Схема шариковых преобразователей расхода: а, б — для больших и малых расходов; 1 — формирователь потока; 2 — шарик; 3 — ограничительное кольцо; 4 — струевыпрямитель; 5 — тахометрический преобразователь

Для небольших расходов применяется конструкция, представленная на рис. 13.4, 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 под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы, а под действием осевой составляющей скорости потока — к ограничительному кольцу, т.е. шару, кроме сил вязкого трения жидкости, необходимо преодолевать силы трения о поверхность трубы и ограничительного кольца (см. рис. 13.4, а). 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  $v = kG_0$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, можно получить  $f = kG_0(1 - S)/(2\pi r)$ . Таким образом, для обеспечения однозначной зависимости между  $f$  и объемным расходом  $G_0$  надо иметь постоянство  $S$ . Этот коэффициент меньше всего изменяется в области  $Re$  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.

Выпускаемые промышленностью шариковые расходомеры, изображенные на рис. 13.4, используются для измерения расхода жидкостей от 0,025 до 600 м<sup>3</sup>/ч, при температуре до 285 °С и давлении до 10 МПа. Плотность среды должна находиться в пределах 700...1400 кг/м<sup>3</sup> и кинематическая вязкость в пределах  $(0,3...12) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Из-за отсутствия опор у подвижного элемента расходомеры могут использоваться на жидкостях с твердыми включениями ограниченного размера и агрессивных. Диапазон измерения шариковых расходомеров обычно равен  $(0,2...1)G_{в.н.}$ , однако в диапазоне  $(0,2...0,3)G_{в.н.}$  они обладают повышенной погрешностью по сравнению с диапазоном  $(0,3...1)G_{в.н.}$ . Относительная погрешность обычно равна  $\pm 1,5\%$  в интервале  $(0,3...1)G_{в.н.}$  и  $\pm 2,5\%$  в интервале  $(0,2...0,3)G_{в.н.}$ .

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  $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), их основная погрешность составляет  $\pm(1,5...2,5) \%$ .

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 большинстве случаев для измерения расхода газа и нефтепродуктов применяются камерные счетчики. Достоинствами их является высокая точность измерения, составляющая  $\pm(0,2...1) \%$  для жидкостей и  $\pm(1...1,5) \%$  для газов, достаточно большой диапазон измерения и слабое влияние вязкости среды. Последнее обстоятельство позволяет применять камерные счетчики для жидкостей вязкостью до  $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Один из приборов камерного типа — счетчик жидкости с овальными шестернями. Такой счетчик предназначен для измерения количества жидкостей, 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  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  и давление до  $64 \text{ кгс/см}^2$  в трубах диаметром до  $100 \text{ мм}$ . Такой счетчик имеет основную погрешность  $\pm 0,5 \%$ . Схема преобразователя с овальными шестернями показана на рис. 13.5.

В положении шестерен по рис. 13.5, а под действием разности давлений  $p_1 - p_2$  возникает момент, вращающий левую шестерню против часовой стрелки. При этом правая шестерня будет ведомой и за счет зубчатого сцепления будет поворачиваться по часовой стрелке. Через половину оборота шестерни установятся в положение рис. 13.5, б. Тогда вращающий момент будет создаваться на правой шестерне, левая становится ведомой. За полный оборот измерительные камеры (на рис. 13.5 заштрихованы) дважды наполняются и опорожняются, т.е. за один оборот объем пропускаемой жидкости равен четырем объемам одной измерительной камеры. На счетный

механизм передается движение одной из шестерен посредством магнитной муфты или тахометрического дифференциально-трансформаторного преобразователя скорости. Изменение вязкости жидкости может увеличить погрешность счетчика.

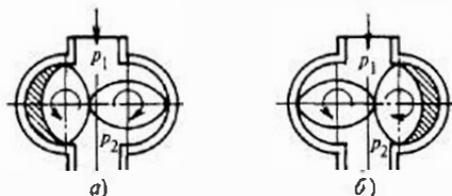


Рис. 13.5. Схема счетчика с овальными шестернями

### 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  $10^{-5} \text{ См/м}$ . В настоящее время электромагнитные расходомеры это самые распространенные приборы для измерения расхода воды в трубопроводах диаметром менее  $250 \text{ мм}$ . Что объясняется их следующими положительными чертами:

- показания не зависят от вязкости и плотности среды;
- динамический диапазон достигает 100 и более;
- преобразователи расхода являются безынерционными;
- они не имеют частей, выступающих внутрь трубы, и, таким образом, не создают потери давления;
- влияние местных сопротивлений значительно меньше, чем у других расходомеров, поэтому требуемая длина прямых участков для них минимальная;
- электромагнитные расходомеры применяются на трубопроводах диаметром от 2 до  $4000 \text{ мм}$ ;
- 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, пульп, жидких металлов.

К числу недостатков электромагнитных расходомеров следует отнести требования к минимальному значению электропроводности измеряемой среды, что сужает круг использования таких расходомеров. Другой недостаток расходомеров — низкий уровень информативного сигнала ( $\text{мкВ}$ ) и необходимость тщательной защиты преобразователя и линий связи от внешних помех.

Отечественными и зарубежными фирмами выпускается широкий спектр микропроцессорных электромагнитных расходомеров: МР400 (ф. «Взлет»), ИПРЭ-1 (Арзамасский приборостроит. з-д), РМ-5 (ф. «ТБН»), РОСТ13, ТРЭМ-ПР (з-д «Молния»), ВИС. Т (ф. «Тепловизор»), РСМ-05 (ф. «ТЭМ-прибор»), VA 2305 (ф. Aswega),

Magne W 3000 PLUS (ф. Honeywell), IMT96 (ф. Foxboro), ADMAD (ф. Yokogawa), SITRANS FM (ф. Siemens) и др. Эти приборы помимо цифровых показаний и токового выходного сигнала могут иметь импульсный выход, интерфейсы RS-232, RS-485, а в ряде случаев HART-, BRAIN- и Profibus-протоколы.

Принципиальная схема первичного преобразователя электромагнитного расходомера показана на рис. 13.6, а. Рабочий участок трубы преобразователя 1, изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией 2 (резиной, эмалью, фторопластом и т.п.), расположен между полюсами электромагнита. 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

$$E = BDu,$$

где  $B$  — индукция магнитного поля;  $u$  — средняя скорость жидкости;  $D$  — длина жидкостного проводника, равная диаметру трубы.

Учитывая, что  $u = 4G_0/(\pi D^2)$ , получаем:

$$E = 4BG_0/(\pi D),$$

где  $G_0$  — объемный расход.

Отсюда следует, что  $E$  прямо пропорциональна объемному расходу. Измерение наведенной ЭДС осуществляется измерительным

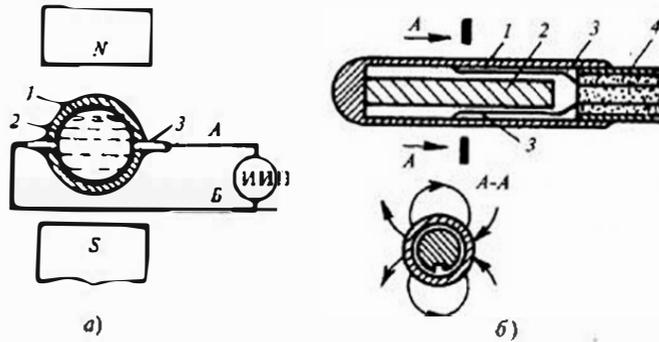


Рис. 13.6. Схема преобразователей электромагнитных расходомеров:

а — с внешним магнитом; 1 — преобразователь; 2 — электрическая изоляция; 3 — электроды; б — с внутренним магнитом; 1 — обтекаемый корпус; 2 — магнит; 3 — электроды; 4 — кабель

прибором ИП, к которому предъявляются жесткие требования по значению его входного сопротивления  $Z_{вх}$ . Для обеспечения малого влияния внутреннего сопротивления электромагнитного преобразователя  $Z_{вн}$  необходимо выполнение соотношения

$$Z_{вн}/Z_{вх} = 100 \dots 500. \quad (13.3)$$

Внутреннее сопротивление преобразователя растет с уменьшением электропроводности жидкости и увеличением  $D$ , что вызывает необходимость увеличения  $Z_{вн}$ , однако этому препятствует емкостное сопротивление соединительных проводов, включенное параллельно  $Z_{вн}$ . Поэтому необходимость выполнения условия (13.3) накладывает ограничения на минимальную электропроводность измеряемой жидкости.

Применение постоянных электромагнитов 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 поверхности электродов создаются потенциалы, образующие 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 сред с электронной проводимостью, например расплавленных металлов, в которых отсутствует явление поляризации.

В качестве примера на рис. 13.6, б представлена схема электромагнитного преобразователя скорости с цилиндрическим магнитом. Основными элементами преобразователя 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 из корпуса с помощью кабеля 4. При обтекании преобразователя жидким металлом между электродами появляется разность потенциалов, пропорциональная скорости металла.

Для измерения расхода сред с ионной проводимостью применяются расходомеры с переменным магнитным полем, создаваемым

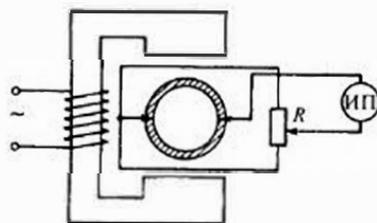


Рис. 13.7. Схема расходомера с переменным магнитным полем

электромагнитом (рис. 13.7). При синусоидально изменяющейся магнитной индукции, имеющей амплитудное значение  $B_m$  и частоту  $f$ , выражение для ЭДС имеет вид

$$E = 4G_0 B_m \sin(2\pi f t) / (\pi D). \quad (13.4)$$

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  $E_m$ . Эта ЭДС наводится рабочим магнитным полем  $B = B_m \sin(2\pi f t)$  в контуре (см. рис. 13.6, а) провод  $A$  — электрод — жидкость — электрод — провод  $B$  — вход измерительного прибора ИП. В соответствии с законом электромагнитной индукции

$$E_m = -S dB/dt = -2\pi f S B_m \cos(2\pi f t), \quad (13.5)$$

где  $S$  — площадь проекции контура, пронизываемого магнитным полем, на плоскость, проходящую через ось трубы и линию электродов.

Сравнением (13.4) и (13.5) легко установить, что  $E$  и  $E_m$  сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , кроме того,  $E_m$  от расхода не зависит и существует даже при  $G_0 = 0$ . Обе эти особенности используются для уменьшения влияния  $E_m$  на показания прибора. Значение  $E_m$  можно уменьшить, располагая провода  $A$  и  $B$  (см. рис. 13.6, а) в одной плоскости, параллельной силовым линиям магнитного поля. Обычно для ослабления влияния  $E_m$  используется схема, представленная на рис. 13.7. 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 второму электроду. При нулевом расходе перемещением движка резистора необходимо добиться минимального сигнала на входе измерительного прибора.

Оба описанных приема не устраняют трансформаторную ЭДС полностью. В современных расходомерах для ее полного устранения используется сдвиг по фазе на  $90^\circ$  между  $E$  и  $E_m$ . В этом случае измерительная схема содержит два канала, один из которых предназначен для измерения полезного сигнала, второй — для компенсации трансформаторной ЭДС. С помощью фазочувствительных детекто-

ров по первому каналу пропускается только информативный сигнал, который затем измеряется показывающим или регистрирующим прибором. По второму каналу проходит только сигнал, пропорциональный  $E_m$ , который затем по цепи отрицательной обратной связи поступает на вход схемы и компенсирует трансформаторную ЭДС.

Большинство перечисленных преобразователей расхода имеют внешнее магнитное поле. Они выпускаются на диаметры условного прохода 2,5; 5; 10; 15; 25; 32; 40; 50; 80; 100; 150; 200; 300 мм для жидкостей с температурой от  $-40$  до  $180^\circ\text{C}$  и давлением до 4 МПа. Расходомеры работают в диапазоне скоростей потока  $0,1 \dots 10$  м/с, некоторые из расходомеров являются двунаправленными, т.е. могут измерять расход реверсных потоков. Предел основной относительной погрешности общепромышленных преобразователей лежит в диапазоне  $\pm(0,5 \dots 1)\%$ .

Для питания электромагнитов преобразователей используется ток переменный или однополупериодный с частотой  $5 \dots 7$  Гц. В некоторых расходомерах на обмотки магнитов подается ток двойной частоты 75 и 6,25 Гц (ADMAG AM, AE, CA). Один из вариантов устранения ЭДС поляризации, возникающей при питании электромагнита однополярным пульсирующим током, создающим магнитный поток с индукцией  $B$ , иллюстрирует схема на рис. 13.8. В момент  $t_1$  в обмотку подается импульс тока, который прекращается в момент  $t_3$ . В момент  $t_0$  на электродах остается ЭДС поляризации, поскольку этот процесс является более инерционным. Значение этого напряжения и напряжения, соответствующего моменту  $t_2$ , фиксируется микропроцессором. Разность этих сигналов представляет собой информативный сигнал, пропорциональный  $G_0$ . При питании электромагнита низкочастотными импульсами тока разной полярности ЭДС поляризации для моментов, аналогичных  $t_0$  вычитаются.

Для измерения расходов в трубопроводах диаметром более 300 мм используется метод измерения локальной скорости потока (методы «площадь—скорость» и «площадь—скорость—градиент»). В преобразователях «площадь—скорость» электромагнит с помощью штанги вводится в поток на расстояние  $0,242$  радиуса от стенки трубопровода.

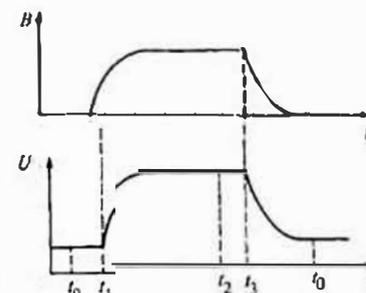


Рис. 13.8. Выходной сигнал (миллиампер) электромагнитного преобразователя

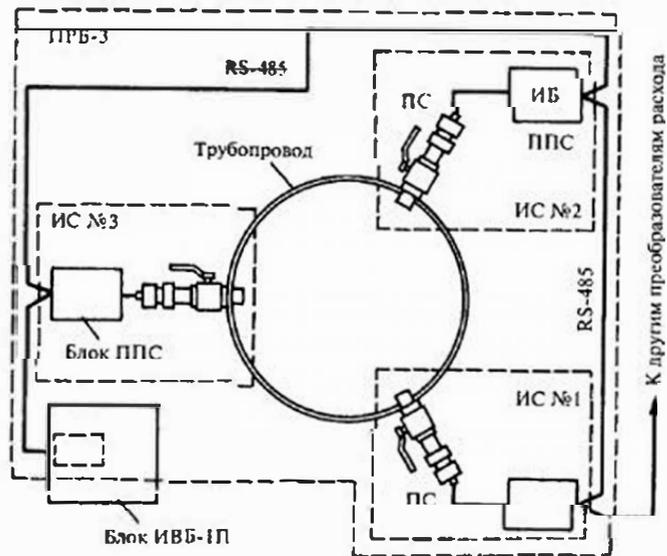


Рис. 13.9. Структурная схема электромагнитного расходомера РМ-5-Б3

В этой точке при осесимметричном потоке в фиксированном диапазоне расходов локальная скорость потока с небольшой погрешностью равна средней по сечению, т.е. выходной сигнал преобразователя определяется средней скоростью и, следовательно, по (13.4) будет связан с объемным расходом. Сигнал преобразователей типа «площадь—скорость—градиент» меньше зависит от несимметрии профиля скоростей.

Схема преобразователя РМ-5-Б3 дана на рис. 13.9. В этих преобразователях используются три измерителя скорости ИС, включающих локальные преобразователи скорости ПС и измерительные блоки ИБ, образующие измерительный блок ППС. Преобразователи скорости располагаются равномерно по окружности, причем все они ориентированы по радиусу канала. Микропроцессорная обработка сигналов трех преобразователей в измерительно-вычислительном блоке ИВБ-1П обеспечивает измерение объемного расхода в трубопроводах диаметром до 5000 мм с относительной погрешностью  $\pm(1,5...2)\%$  (РМ-5-Б3), при использовании одного преобразователя (РМ-5-Б1) погрешность возрастает до  $\pm(2...3)\%$ . Погружение ПС в трубопровод производится с помощью шлюзовых камер, что позволяет производить их замену и извлечение без опустошения трубопровода. Шлюзовая камера отсекается от трубопровода с помощью шарового

крана, имеющего проходное отверстие для штанги преобразователя. При давлениях до 2 МПа три резиновых кольца на штанге преобразователя обеспечивают ее герметичный ввод при выполнении следующей последовательности операций: ввод штанги в шлюз при закрытом шаровом кране; ручное открытие шарового крана; погружение штанги преобразователя в трубопровод. Для удержания штанги при открытии шарового крана и подаче в шлюз давления, а также для ее погружения в трубопровод используется специальное приспособление.

### Контрольные вопросы

1. Проанализируйте область применения, достоинства и недостатки расходомера постоянного перепада давления.
2. Какие силы обеспечивают нахождение в потоке поплавка во взвешенном состоянии.
3. Как вводится поправка на изменение плотности среды в показания поплавкового расходомера?
4. Охарактеризуйте область применения тахометрических расходомеров, их положительные и отрицательные стороны.
5. Как нормируется погрешность тахометрических расходомеров?
6. Каков принцип действия камерных расходомеров?
7. Расход каких сред могут измерять электромагнитные расходомеры?
8. Почему требуется тщательное заземление корпусов электромагнитных преобразователей и экранирование линий связи?
9. На какую глубину в трубы больших диаметров погружаются зонды электромагнитных преобразователей и чем она определяется?

## Глава четырнадцатая

### УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ, ВИХРЕВЫЕ И МАССОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ. ТЕПЛОСЧЕТЧИКИ

#### 14.1. Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на измерении зависящего от расхода того или иного акустического эффекта, возникающего при прохождении ультразвуковых колебаний через контролируемый поток жидкости или газа.

В последнее время используются две разновидности ультразвуковых расходомеров: расходомеры, основанные на перемещении ультразвуковых колебаний движущейся средой и доплеровский. Наибольшее распространение получила первая группа приборов. В таких расходомерах ультразвуковые колебания, создаваемые пьезоэлементами, направляются по потоку жидкости и против него. Разность времен прохождения  $\Delta t$  ультразвуковыми импульсами расстояния между излучателем и приемником по потоку и против потока пропорциональна скорости потока, т.е. скорость ультразвука относительно стенок трубы зависит от скорости потока.

Основные трудности использования ультразвукового метода связаны с тем, что скорость ультразвука в среде зависит от физико-химических свойств последней: температуры, давления, и она значительно больше скорости среды, так что действительная скорость ультразвука в движущейся среде мало отличается от скорости в неподвижной среде. Разность времен прохождения  $\Delta t$  равна  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  с даже при скоростях потока  $10 \dots 15$  м/с, причем измерять  $\Delta t$  нужно с погрешностью  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с. Эти обстоятельства обуславливают необходимость применения сложных электронных схем в сочетании с микропроцессорной техникой, обеспечивающих компенсацию влияния перечисленных факторов.

Ультразвуковые расходомеры в последние годы получают все более широкое распространение благодаря следующим положительным чертам:

- значительному динамическому диапазону, достигающему 25—30;
- высокой точности измерения, составляющей  $\pm(1;2) \%$ ;

- возможности измерения расхода неэлектропроводных сред (нефтепродукты), загрязненных сред, суспензий;
  - широкому диапазону диаметров трубопроводов от 10 мм и выше без ограничений;
  - малой инерционности;
  - отсутствию потери давления;
  - широкому диапазону температур (от  $-220$  до  $600$  °С) и давлений.
- К недостаткам этого метода измерения расхода следует отнести:
- необходимость значительных длин линейных участков до и после преобразователя;
  - влияние на показания пузырьков воздуха в потоке;
  - необходимость контроля отложений в трубопроводе на его рабочем участке;
  - сложность и высокая стоимость приборов, которая при прочих равных условиях в 3—4 раза превышает стоимость тахометрических и электромагнитных расходомеров;
  - ограничения по минимальной скорости потока.

Все ультразвуковые расходомеры являются микропроцессорными, на выходе они имеют токовый и импульсный выходные сигналы, цифровой дисплей, интерфейсы RS-232, RS-485, цепь сигнализации, значение суммарного расхода архивируется вместе с указанием нештатных ситуаций. Многие приборы могут измерять расход реверсивного потока.

Расходомеры по конструктивному исполнению подразделяются на одно- и двухканальные. В одноканальной схеме (рис. 14.1, а) каждый пьезоэлемент работает попеременно в режиме излучателя и приемника, что обеспечивается системой переключателей. Для увеличения чувствительности ход луча в среде может быть увеличен применением рефлекторов (рис. 14.1, б). Чувствительность ультра-

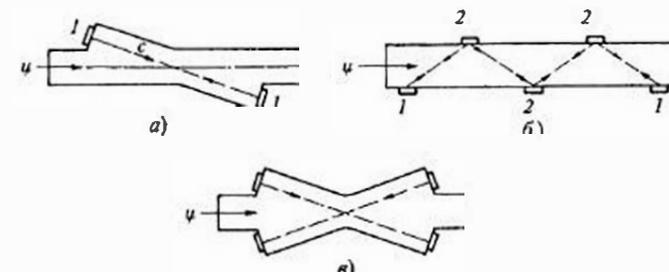


Рис. 14.1. Схемы ультразвуковых преобразователей расходомеров: а — одноканального; б — с отражателями; в — двухканального

звуковых преобразователей также растет с уменьшением угла  $\alpha$  между векторами скорости потока и ультразвука  $c$ . В двухканальной схеме (рис. 14.1, в) каждый пьезоэлемент работает только в одном режиме — излучателя или приемника. Двухканальные схемы проще одноканальных (нет сложных схем переключения), но точность их меньше, вследствие возможной акустической асимметрии обоих каналов.

Если расстояние между излучателем и приемником обозначить через  $L$ , то время распространения импульса по потоку можно записать в виде

$$\tau_1 = L/(c + u_L \cos \alpha) = L/c(1 + u_L \cos \alpha/c),$$

где  $u_L$  — скорость среды, усредненная по длине пути луча от излучателя до приемника.

Время прохождения импульса против потока составляет

$$\tau_2 = L/(c - u_L \cos \alpha) = L/c(1 - u_L \cos \alpha/c).$$

Пренебрегая в знаменателе членом  $u_L^2 \cos^2 \alpha$ , получаем, что разность времен прохождения импульсов

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = 2Lu_L \cos \alpha/c^2. \quad (14.1)$$

Таким образом, показания ультразвуковых расходомеров зависят от скорости потока  $u_L$ , 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  $u_{ср}$ , усредненной по диаметру трубы. Для трубопроводов круглого сечения даже для осесимметричных потоков  $u_{ср} \neq u_L$  и соотношение между ними зависит от эпюры скоростей потока. Это обстоятельство является недостатком ультразвуковых расходомеров, определяющим наиболее существенную составляющую методической погрешности.

В общем случае  $u_{ср}$  и  $u_L$  связаны соотношением

$$u_L = k u_{ср}. \quad (14.2)$$

При установившемся турбулентном движении и осесимметричном потоке  $k$  зависит от числа  $Re$ , так как с изменением  $Re$  изменяется характер распределения скоростей, значение  $k$  в этом случае меняется в диапазоне 0,92...0,95. Это является причиной принципиальной нелинейности статических характеристик ультразвуковых расходомеров при их индивидуальной градуировке. В ультразвуковых

вых расходомерах SITRANS F фирмы Siemens, благодаря наличию отражателей, ход луча состоит из пяти отрезков, три из которых направлены по хордам, что обеспечивает сканирование профиля потока и измерение средней скорости потока в широком диапазоне измерения его скоростей. При максимальной скорости потока 10 м/с обеспечивается погрешность измерения расхода  $\pm 0,5\%$  в динамическом диапазоне 25 и  $\pm 1\%$  в диапазоне 100. В зависимости от типа местного сопротивления длина линейного участка трубопровода составляет  $(10...40)D$  до преобразователя и  $5D$  после него.

По методу определения  $\Delta\tau$  ультразвуковые расходомеры подразделяются на импульсные, частотные и фазовые.

Во *временных импульсных расходомерах* периодически производится измерение  $\Delta\tau$  коротких импульсов длительностью 0,1...0,2 мкс, по которым затем в соответствии с (14.1) и (14.2) определяется объемный расход  $G_0$ . Микропроцессорные расходомеры UFM 005 (ЗАО «Центроприбор», ПО «Промприбор») предназначены для измерения расхода воды и устанавливаются в трубопроводах диаметром 15...1600 мм. В их состав входит для диаметров до 200 мм первичный преобразователь УПР, свыше 200 мм — пьезопреобразователи для врезки в трубопровод и вычислитель ультразвуковой УВ. Первичный преобразователь УПВ представляет отрезок трубы с двумя врезанными пьезоэлектрическими преобразователями и приваренными по торцам фланцами. При проливном методе поверки расходомеры в области расходов от переходного до верхнего предела при динамическом диапазоне 25 имеют погрешность  $\pm 1,5\%$ , а от переходного до минимального —  $\pm 4\%$ , причем  $G_{max}/G_{min}$  составляет 70—75. Расходомер помимо цифрового индикатора имеет токовый выходной сигнал 0...5 мА, интерфейсы RS-232 и RS-485, в ПЗУ хранится архив среднечасовых и среднесуточных значений количества воды глубиной 5000 ч.

В *частотных расходомерах* каждый последующий импульс посылается излучателем только после достижения предыдущим импульсом прismsого пьезоэлемента. Очевидно, что если время между импульсами равно  $\tau$ , то частота следования их  $f = 1/\tau$ . При этом частота следования импульсов по потоку  $f_1 = (c + u_L \cos \alpha)/L$ , а против потока  $f_2 = (c - u_L \cos \alpha)/L$ .

Разность частот следования импульсов, определяемая дифференциальной схемой, связана со скоростью и объемным расходом:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = 2u_L \cos \alpha/L; G_0 = \pi D^2 L \Delta f / (8k \cos \alpha).$$

Из этой формулы следует, что показания частотных расходомеров не зависят от скорости распространения ультразвука в неподвижной среде, а следовательно, и от физико-химических свойств и параметров среды. Это является достоинством частотных расходомеров.

В фазовых расходомерах измеряется разность фаз  $\Delta\varphi$  ультразвуковых колебаний частотой  $f$ , распространяющихся по потоку и против него. При одинаковой начальной фазе колебаний  $\Delta\varphi = 2\pi f\Delta t$ , или с учетом (14.1)  $\Delta\varphi = 4\pi f L v_L \cos \alpha / c^2$ , отсюда  $G_0 = D^2 c^2 \Delta\varphi / (16 k f L \cos \alpha)$ . Недостаток этих расходомеров — зависимость показаний от изменения скорости звука.

В доплеровских ультразвуковых расходомерах используется отражение ультразвуковых колебаний движущимися частицами потока. Так, если частота излучаемых колебаний составляет  $f_1$ , а частота отраженных —  $f_2$ , то между разностью этих частот и скоростью частицы  $u$  имеет место зависимость  $f_1 - f_2 = u(\cos \alpha' + \cos \alpha'')/c$ , где  $c$  — скорость звука в неподвижной среде;  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  — углы между направлением исходного луча и вектором скорости частицы-отражателя, и между направлением отраженного луча, воспринимаемого пьезоэлементом и вектором скорости частицы-отражателя (рис. 14.2). Если  $\alpha' = \alpha''$ , то  $f_1 - f_2 = 2f_1 u \cos \alpha' / c$ .

Доплеровские расходомеры измеряют местную скорость звука. В трубах малого и среднего диаметров эти расходомеры могут измерять среднюю скорость по диаметру или части площади трубы. В трубах больших диаметров при наличии прямых участков достаточной длины отражатель должен находиться на расстоянии  $0,12 D$  от стенки трубы, где скорость соответствует средней скорости потока. В противном случае необходима индивидуальная градуировка расходомера.

В корреляционных датчиках расхода ДРК доплеровский эффект используется для определения времени прохождения случайными (турбулентными) флуктуациями между двумя смещенными по длине трубы парами ультразвуковых преобразователей. Микропроцессор производит статистическую обработку сигналов, поступивших в приемники ультразвуковых колебаний каждого из сечений. Скорость потока определяется по времени, соответствующем максимуму корреляционной функции,



Рис. 14.2. Схема доплеровского преобразователя

максимуму корреляционной функции,

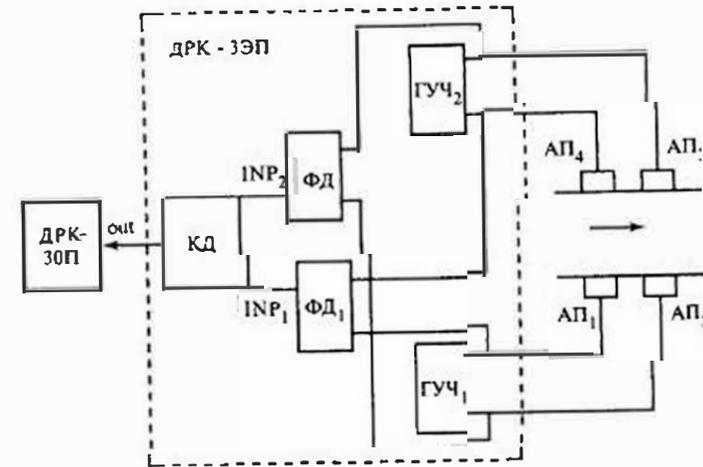


Рис. 14.3. Структурная схема корреляционного доплеровского расходомера

связывающей сигналы, поступившие на оба приемника. На рис. 14.3 представлена структурная схема датчика расхода корреляционного ДРК ф. «Метран». Сигналы ультразвуковой частоты поступают от генераторов  $ГУЧ_1$ ,  $ГУЧ_2$  на акустические преобразователи  $АП_1$ — $АП_2$ , сигналы которых вызывают, благодаря доплеровскому эффекту, вторичные колебания, которые накладываются на основные. Фазовые детекторы  $ФД_1$ ,  $ФД_2$  и корреляционный дискриминатор  $КД$ , управляемый микропроцессором, обеспечивают получение импульсного сигнала, пропорционального расходу. Эти сигналы могут суммироваться и выводиться на цифровой индикатор, подаваться на конечный преобразователь ДРК-30П или тепловычислитель. Такие расходомеры могут устанавливаться в трубопроводах диаметром от 50 до 4000 мм при скорости среды от 0,1 до 10 м/с, предел относительной погрешности составляет  $\pm 1,5; 2\%$ .

## 14.2. Вихревые и массовые расходомеры

В вихревых расходомерах значение расхода определяется по частоте вихрей Кармана, возникающих как при введении в поток тела обтекания, так и при специальном закручивании потока. К достоинствам этого метода можно отнести:

- возможность измерения расхода жидких и газовых сред;
- отсутствие движущихся элементов в потоке и простота устройства;

- широкий динамический диапазон, достигающий 25;
- широкий диапазон давлений и температур измеряемых сред;
- высокая точность.

К недостаткам этого метода относятся:

- ограничения по диаметру трубопровода  $D = (20 \dots 150)$  мм;
- ограничения по вязкости, которая не должна превышать  $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
- для обеспечения устойчивого вихреобразования скорость потока должна быть не менее 0,2 м/с;
- наличие потери давления, достигающей 30 кПа;
- воздействие на преобразователь акустических и вибрационных помех, создаваемых насосами, компрессорами, местными сопротивлениями. Для снижения влияния последних необходимо обеспечить определенную длину линейных участков до и после вихревого преобразователя.

Наибольшее распространение получили вихревые расходомеры с телом обтекания, которое находится на пути потока и изменяет направление движения омывающих его струй. Характер движения потока при обтекании цилиндра и образование вихрей представлены на рис. 14.4. При обтекании цилиндра скорость потока возрастает, кинетическая энергия растет, а потенциальная падает. После середины сечения, где площадь минимальная, поток расширяется, скорость его снижается и давление растет. Под влиянием возрастающего давления пограничный слой начинает отклоняться в область мертвой зоны, создавая встречный потоку свертывающийся вихрь. Развитие вихря с одной стороны препятствует образованию вихря с другой, поэтому создаются две вихревые дорожки с шахматным расположением вихрей в них.

Процесс вихреобразования характеризует число Струхала  $Sh = f d / u$ , где  $f$  — частота образования вихрей;  $u$  — скорость потока;  $d$  — характерный размер тела обтекания, для цилиндра это диаметр. При постоянстве  $Sh$  частота образования вихрей меняется пропорционально изменению скорости потока. Таким образом, для получе-

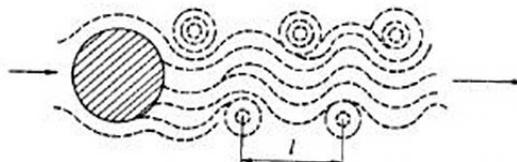


Рис. 14.4. Схема образования вихрей Кармана

ния линейной зависимости между  $f$  и  $u$  необходимо, чтобы число Струхала оставалось постоянным в широком диапазоне чисел  $Re$ .

На процесс вихреобразования влияет вибрация трубопровода, создаваемая насосами, компрессорами, акустические колебания, возникающие из-за местных сопротивлений и внешних шумов. Наиболее распространенной формой тела обтекания, создающей устойчивые вихри, является призма с треугольным или трапециевидальным сечением, обращенная основанием навстречу потока. Рекомендуется, чтобы длина основания  $l$  составляла  $l/3D$ , а высота по направлению потока  $1,3l$ . Для таких тел при острых ребрах число  $Sh$  остается постоянным в области чисел  $Re 10^4 \dots 4 \cdot 10^6$  при нелинейности градуировки не превышающей  $\pm 0,5 \%$ .

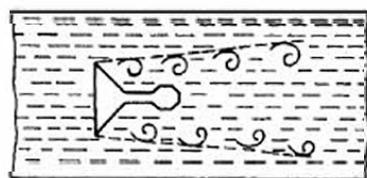
Для измерения частоты возникающих вихрей могут использоваться электромагнитные, акустические, силовые преобразователи и термоанемометры. Так, в вихревом микропроцессорном расходомере ВЭПС ф. «Саяны» телом обтекания служит призма, которая является одним электродом электромагнитного преобразователя. Второй электрод расположен за телом обтекания. Магнитное поле создается внешним постоянным магнитом. Динамический диапазон прибора составляет 25 при пределе относительной погрешности  $\pm 1 \%$ . Прибор изготавливается для трубопроводов диаметром 20...300 мм. На эти приборы распространяются все ограничения, которые относятся к электромагнитным расходомерам.

В вихреакустических микропроцессорных преобразователях расхода «Метран-300ПР» частота образования вихрей измеряется ультразвуковым преобразователем, основанным на доплеровском эффекте. Телом обтекания служит призма, в проточную часть преобразователя помимо нее введены два пьезоизлучателя, два пьезоприемника и термопреобразователь. Электронный блок включает генератор, фазовый детектор, микропроцессорный адаптивный фильтр с блоком формирования выходных сигналов.

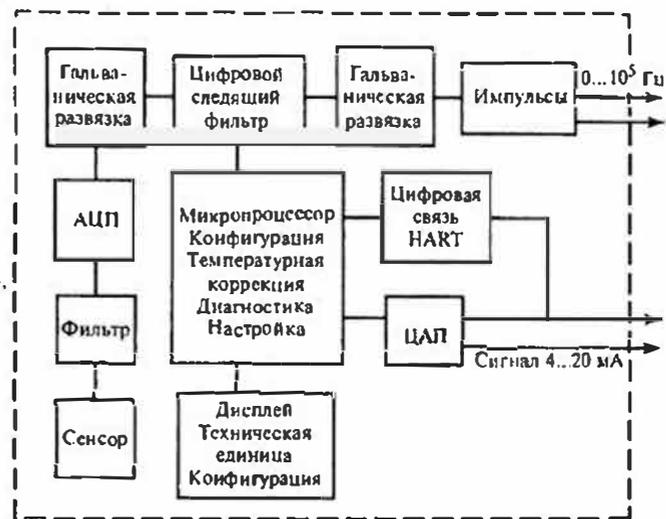
Пьезоизлучатели и пьезоприемники находятся в двух парах стаканчиков, введенных в одном сечении диаметрально противоположно друг другу в корпус проточной части за телом обтекания. На пьезоизлучатели подается переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. Наличие вихрей на пути луча вызывает модуляцию ультразвуковых колебаний по фазе, которые измеряются фазовым детектором. Использование двухлучевых преобразователей снижает влияние таких отрицательных факторов как вибрация трубопровода, пульсация давления. Наличие термопреобразователя и введение его сигнала в микропроцессор обеспе-

чивает расширение динамического диапазона прибора, который достигает 100 при пределе основной погрешности  $\pm 1\%$ .

В вихревых расходомерах типа 8800А фирмы Rosemount в качестве чувствительного элемента, воспринимающего колебания давления, создаваемые вихрями Кармана, служит гибкая пластинка, находящаяся за телом обтекания. Колебания пластинки с помощью коромысла воздействуют на тензопреобразователь, находящийся вне потока. Схема преобразователя и структурная схема электронного блока, преобразующего сигнал тензопреобразователя в токовый и импульсный выходные сигналы, в том числе в соответствии с HART-протоколом, показания расхода на цифровом дисплее, представлена на рис. 14.5. Эти преобразователи устанавливаются в трубопроводах диаметром 15...200 мм. Предел относительной погреш-



а)



б)

Рис. 14.5. Схема вихревого расходомера:

а — схема фрагмента сенсора; б — структурная схема электронного блока

ности для жидкостей при  $Re > 20\,000$  составляет  $\pm 0,65\%$ , для газов и пара при  $Re > 15\,000 \pm 1,35\%$ .

Массовые расходомеры являются разновидностью силовых расходомеров, у которых выходной сигнал или показания пропорциональны массе протекающего вещества. В массовых расходомерах используются кориолисовы силы, поэтому их часто называют кориолисовыми расходомерами. Эти расходомеры в основном применяются для измерения небольших массовых расходов в трубопроводах диаметром 5...150 мм. Предел основной погрешности в различных моделях этих расходомеров составляет  $\pm(0,1...0,5)\%$  при динамическом диапазоне от 20 до 80.

Кориолисово ускорение и связанная с ним сила возникают при наличии радиального переносного движения среды во вращающемся или вибрирующем трубопроводе. Для участка трубопровода, изображенного на рис. 14.6, закручивающий момент, действующий на торсионную трубку 1, составляет

$$M_k = 2uF\omega(r_2^2 - r_1^2) = \omega(r_2^2 - r_1^2)G_m,$$

где  $u$  — скорость радиального движения жидкости в трубках сечением  $F$  при угловой скорости их вращения  $\omega$ ;  $r_2$  — радиус наружного конца трубки 2, имеющей эластичное соединение 3 с концом ведущей трубки 4;  $r_1$  — средний радиус, на котором прекращается движение жидкости в радиальном направлении;  $G_m$  — массовый расход жидкости.

В массовых расходомерах фирмы Micro Motion используются первичные преобразователи с изогнутой трубкой и прямоточные. В этих преобразователях измеряемая среда движется внутри вибрирующей мерной трубки специальной формы. Под действием кориолисовой силы части мерной трубы изгибаются друг относительно друга, что приводит к рассогласованию фаз колебаний ее разных участков, которые воспринимаются электромагнитным преобразователем. Массовые расходомеры для жидкостей и газов типов CFS10, CFS20 (с изогнутой трубкой) и CFT (с прямой трубкой) выпускает фирма Foxboro, аналогичные модели массовых расходомеров производит фирмы PROline Promass и др.

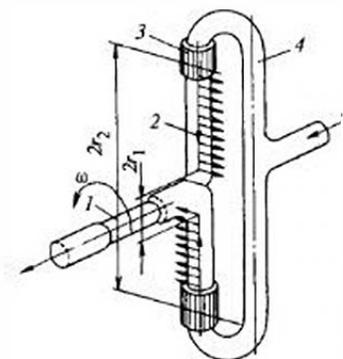


Рис. 14.6. Силы, действующие в кориолисовом расходомере:

1 — торсионная трубка; 2 — трубка с эластичным соединением 3; 4 — ведущая трубка

### 14.3. Теплосчетчики

Теплосчетчик — средство измерения, предназначенное для определения количества теплоты. Количество теплоты обычно выражается в гигаджоулях (ГДж) или гигакалориях (Гкал), 1 Гкал = 4,1868 ГДж.

Теплосчетчики получили широкое распространение, поскольку по их показаниям производятся расчеты за полученную потребителями теплоту. Теплосчетчики устанавливаются как на источниках теплоты: ТЭЦ, РТС (районные тепловые станции), так и у потребителей, теплоносителем служит вода, редко — пар. Все выпускаемые в настоящее время теплосчетчики являются многофункциональными микропроцессорными приборами, включающими в свой состав измерители температуры, расхода, давления и тепловычислители. Они имеют защиту от несанкционированного доступа, а используемые в них программы и заложенные функциональные возможности исходят из действующих правил как учета теплоты и теплоносителя, так и теплопотребления.

**Алгоритмы расчета количества теплоты.** Реализуемые в теплосчетчиках алгоритмы расчета теплоты зависят от вида теплоносителя и структуры системы отпуска теплоты. Последняя, изображенная на рис. 14.7, может быть закрытой, когда количество теплоносителя в системе теплоснабжения остается постоянным, и открытой, когда количество теплоносителя меняется из-за отпуска теплоносителя

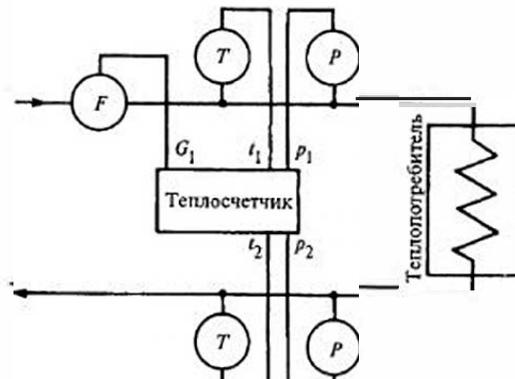


Рис. 14.7. Схема закрытой системы теплоснабжения

на нужды горячего водоснабжения, подпитку независимой системы теплоснабжения, из-за утечек.

В закрытой системе теплоснабжения количество отданной теплоты  $Q$  за интервал времени  $T_1, T_2$  рассчитывается по формуле

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} G_m (h_1 - h_2) dT, \quad (14.3)$$

где  $G_m$  — массовый расход теплоносителя;  $h_1, h_2$  — энтальпии теплоносителя на входе и выходе системы теплоснабжения;  $T$  — время.

Для расчета количества теплоты, отданной водой в открытой системе теплоснабжения, используются несколько алгоритмов, зависящих от структуры системы, используемых средств измерения расхода теплоносителя и места их установки:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} [G_1 (h_1 - h_2) + (G_1 - G_2) (h_2 - h_{x,в})] dT, \quad (14.4)$$

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} [G_1 (h_1 - h_2) + G_n (h_2 - h_{x,в})] dT. \quad (14.5)$$

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} [G_1 (h_1 - h_2) + (G_{г,в} + G_y + G_{п,о}) (h_2 - h_{x,в})] dT, \quad (14.6)$$

где  $G_1, G_2$  — расходы воды в подающем (прямом) и обратном трубопроводах;  $G_y, G_n, G_{г,в}, G_{п,о}$  — расходы теплоносителя, связанные с утечкой теплоносителя, компенсацией его потерь (подпитка)  $G_n = G_1 - G_2$ , горячим водоснабжением и подпиткой независимой системы отопления;  $h_{x,в}$  — энтальпия холодной воды, пошедшей на подпитку теплосети у источника теплоснабжения.

Возможны другие варианты записи алгоритмов расчета отпущенной теплоты, основанные на значении расхода в обратном трубопроводе  $G_2$ .

Если в качестве теплоносителя используется пар, то

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} [D_n (h_n - h_k) + (D_n - G_k) (h_k - h_{x,в})] dT, \quad (14.7)$$

где  $D_n, G_k, h_n, h_k$  — расходы пара и возвращенного конденсата, их энтальпии.

Для расчета количества теплоты по выражениям (14.3)–(14.7) необходимо измерять расходы теплоносителя, температуры, давления и суммировать результаты расчета во времени. Определение количества теплоты представляет собой косвенное измерение, его погрешность зависит:

- от погрешностей первичных средств измерения расхода или его разности, разности температур и давления;
- от алгоритма расчета теплоты;
- от погрешности тепловычислителя, которая помимо инструментальной погрешности включает погрешности расчетных соотношений, аппроксимирующих теплофизические свойства воды и пара.

Обычно погрешности тепловычислителя при расчете теплоты составляют  $\pm(0,1...0,25)$  %, для измерения разности температур используются парные термопреобразователи сопротивления. Минимальные погрешности имеют теплосчетчики для закрытых систем теплоснабжения, реализующих алгоритм (14.3). Пределы их допускаемых относительных погрешностей в %, согласно ГОСТ 51649-2000 «Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения», не должны превышать значений, рассчитываемых по формулам для классов:

$$C \quad \delta_Q = \pm(2 + 4\Delta t_n / \Delta t + 0,01 G_n / G), \quad (14.8)$$

$$B \quad \delta_Q = \pm(3 + 4\Delta t_n / \Delta t + 0,02 G_n / G), \quad (14.9)$$

$$A \quad \delta_Q = \pm(4 + 4\Delta t_n / \Delta t + 0,05 G_n / G), \quad (14.10)$$

где  $\Delta t$ ,  $G$  — действующие значения разности температур ( $t_1 - t_2$ ) и расхода;  $\Delta t_n$ ,  $G_n$  — наименьшее значение разности температур по паспорту прибора и наибольшее значение расхода.

Так, для теплосчетчика класса  $C$  при  $\Delta t_n = 2$  °C,  $\Delta t = 5$  °C,  $G_n / G = 10$  предел погрешности составит  $\pm 3,61$  %, а при  $\Delta t = 20$  °C,  $G_n / G = 2$  он не должен превышать  $\pm 2,42$  %. Наиболее распространенные теплосчетчики имеют пределы относительной погрешности от  $\pm 3$  до  $\pm 6$  % в зависимости от измеряемой разности температур. При оценке погрешностей этих теплосчетчиков для закрытых систем теплоснабжения суммируются пределы относительных погрешностей измерения расхода, разности температур и тепловычислителя. Полученная суммарная погрешность не должна превышать в зависимости от класса теплосчетчика цифр, определяемых по (14.8)–(14.10).

В открытых системах водяного теплоснабжения и при теплоносителе паре, для которых расчет теплоты производится по (14.4), (14.6), (14.7) погрешности существенно возрастают из-за присутст-

вия в алгоритме расчета двух и более значений расходов и их разностей. Для снижения погрешностей рекомендуется использовать расходомеры с согласованными характеристиками, подобно парным термопреобразователям, рассмотренным в гл. 5. При непосредственном измерении расхода подпиточной воды и расчете теплоты по (14.5) погрешность учета ниже, чем при расчете по (14.4), (14.6).

**Состав теплосчетчиков.** Разнообразие теплосчетчиков отражает многообразие требований потребителей этих приборов. Теплосчетчики стоят на магистралях ТЭЦ с диаметрами трубопроводов до 1400 мм и на трубках диаметром 10...12 мм в квартирах и небольших офисах. Число трубопроводов, по которым теплосчетчик производит расчет теплоты, может варьироваться в пределах десятка. При всем многообразии теплосчетчиков в их составе обязательно присутствуют термопреобразователи, измерители расхода и тепловычислители. Теплосчетчики можно разделить по следующим признакам:

- по типу используемых преобразователей расхода;
- по диаметрам трубопроводов теплоносителя;
- по диапазону измеряемых расходов  $G_{\max} / G_{\min}$ ;
- по количеству потоков теплоносителя (каналов).

В табл. 14.1 для некоторых типов теплосчетчиков приведены характеристики по указанным признакам.

Помимо приведенных данных в табл. 14.1 другие важные характеристики расходомеров, такие как погрешности, требуемая длина линейных участков до и после расходомера, потеря давления были рассмотрены в гл. 12, 13.

Поскольку погрешности измерения теплоты зависят от погрешности измерения разности температур, то в подавляющем большинстве теплосчетчиков используются комплекты платиновых термопреобразователей с согласованными характеристиками типа КТПТР, КТСП, КТП и др. (см. § 5.2).

**Тепловычислители** по конструкции и функциональным возможностям существенно отличаются от рассмотренных выше вторичных приборов. Действующие в РФ правила учета теплоты и теплоносителя, теплопотребления предписывают производить не только расчет количества полученной теплоты, но и обеспечить контроль режима теплопотребления. При этом должна фиксироваться температура воды и расход в подающем и обратном трубопроводах. Первое позволяет контролировать эффективность работы теплообменных устройств, второе — наличие утечек теплоносителя или подсосов водопроводной воды. Так, тепловычислитель ТСПВ-010

Таблица 14.1

## Характеристики теплосчетчиков

Тип преобразователя расхода	Наименование теплосчетчика	Диаметр трубопровода, мм	Динамический диапазон $Q_{\max}/Q_{\min}$	Число каналов по расходу
Диафрагма с дифманомерами	СПТ-961	50...1200	<3 при одном дифманометре	4
	СТД*	»	»	10
Тахометрические	СТ-3	15...250	50	1
	КСТ	15...250	50	4
	ТСК-4М	15...250	25	4
Электромагнитные	SA-9304	10...400	50	4
	Взлет ТСП**	10...200	85	4
	ТРЭМ-ТС	10...300	500	6
	ТС-06	15...200	100	4
	ВИС.Т	15...300	250	5
	ВИС.Т (ТС-П)	400...4000	100	4
	ТЭМ-05	15...150	50	3
	РОСТ-8.1	400...4000	50	2
	Эксперт-МТ	25...80	100	5
	КМ-5	15...300	500	6
РМ-5-БЗ	300...5000	100	1	
Вихревые	Метран-400***	25...200	80	2
	Таран	15...300	40	8
	КСТ-В	15...350	60	2
	Макло	25...200	40	6
Ультразвуковые	Взлет ТСП	10...4200	150	4
	UFEC 005	15...1600	150	2
	Multical UF	15...250	200	4
	ТСК-4М	15...250	33	4

\* Теплосчетчик СТД может работать со всеми типами расходомеров, с зависящими от их типа характеристиками по диапазонам Ду и  $Q_{\max}/Q_{\min}$ .

\*\* К теплосчетчику «Взлет ТСП» дополнительно могут быть подключены два расходомера с импульсным выходом.

\*\*\* Тепловычислитель «Метран-410» может работать с четырьмя расходомерами, имеющими импульсный выходной сигнал: тахометрическими (ВСТ, ВМГ), вихреакустическими («Метран-300 ПР») и акустическими (ДРК-С).

теплосчетчика «Взлет ТСП» обеспечивает выполнение следующих типовых функций:

- показание текущих значений расхода, температуры и давления в 1—4 трубопроводах;
- показание текущих значений объема или массы теплоносителя, подаваемых по 1—4 трубопроводам;

- показание текущего расхода теплоты по 1—2 тепловым системам;

- архивирование в энергонезависимой памяти результатов измерений, вычислений и хранение этих величин при отключении питания;

- ввод и вывод согласованных значений температуры и давления воды в источнике холодного водоснабжения, давления теплоносителя в трубопроводах;

- вывод перечисленной и диагностической информации через последовательные интерфейсы RS-232 (в том числе через телефонный и радиомодемы), RS-485, а также на печатающее устройство через адаптер принтера;

- вывод значений расхода в одном-двух каналах в виде импульсной последовательности, а по одному из каналов в виде унифицированного токового сигнала;

- определение, индикация и запись в архив неисправностей теплосчетчика, нештатных состояний тепловой системы, времени работы и останова теплосчетчика для каждой из тепловых систем;

- защиту архивных данных от несанкционированного доступа.

В качестве примера для закрытой системы теплоснабжения диагностируемые нештатные состояния у теплосчетчика ТСПВ-010 включают:

- превышение расходом  $G_1$  максимального заданного значения;
- снижение расхода  $G_1$  ниже минимального заданного значения;
- $G_2 > G_1$ ;
- $t_2 > t_1$ .

Структурная схема тепловычислителя ТСПВ-010, выполненного в одноплатном варианте, содержит конструктивные элементы, представленные на рис. 14.8. Все первичные преобразователи подключаются к тепловычислителю экранированными проводами. Термопреобразователи (ПТ) подключаются к тепловычислителю по трехпроводной схеме, их число может достигать шести. К электромагнитному преобразователю расхода (ПР) по двум проводам подается импульсное напряжение возбуждения (накачки), по двум — отводится модулированный по амплитуде импульсный сигнал, пропорциональный расходу. Максимальное число расходомеров составляет четыре, при этом два расходомера могут быть ультразвуковыми. Преобразователи давления (ПД) с токовым выходным сигналом 4...20 мА подключаются к тепловычислителю двумя проводами, с сигналом 0...5 мА — тремя проводами. Число преобразователей давления, подключенных к теплосчетчику, может быть

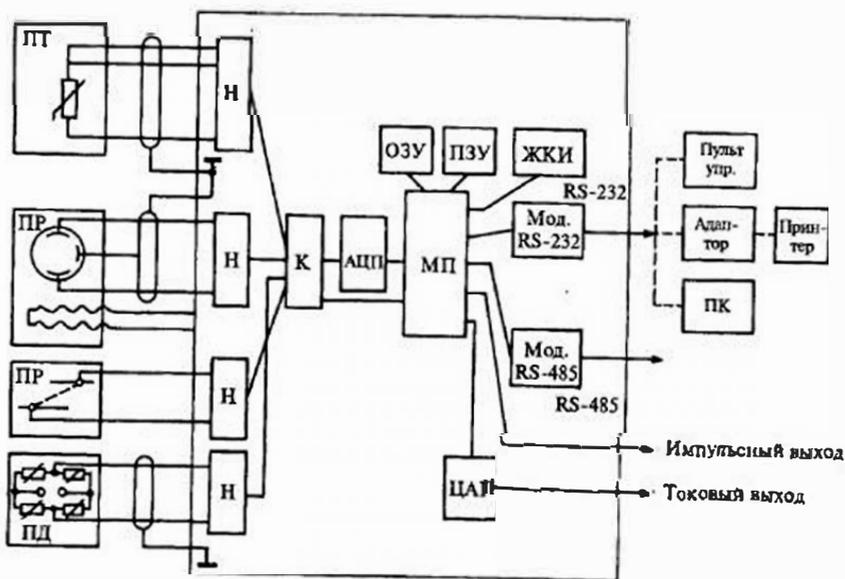


Рис. 14.8. Структурная схема теплосчетчика

увеличено с двух до четырех при сокращении числа термопреобразователей сопротивления.

В тепловычислителе вводимые сигналы нормализуются (Н) и коммутатором (К) периодически подключаются к АЦП, а затем — микропроцессору (МП). В ПЗУ хранятся архивируемые данные, вводимые постоянные, расчетные соотношения, последовательность управляющих команд. Устройства вывода включают блок жидкокристаллического индикатора (ЖКИ), ЦАП, коммутатор, модули RS-232, RS-485 и другие элементы, обеспечивающие работу внешних устройств. Показания тепловычислителя могут сниматься по нескольким каналам: с жидкокристаллического дисплея, по RS-232 через адаптер печататься на принтере, выводиться на персональный компьютер (ПК) или с помощью модема передаваться на удаленные устройства. Этот теплосчетчик имеет импульсный выход и может иметь дополнительно токовый выходной сигнал или интерфейс RS-485. Программирование прибора производится с пульта управления или персонального компьютера.

**Сети приборов коммерческого учета.** Плата за энергоносители, воду является значительной статьей расходов любого производства и жилищно-коммунального хозяйства. На промышленных предпрн-

ятиях, электростанциях, в районах тепловых сетей и прочие, используя интерфейс RS-232 или RS-485, создаются локальные сети, объединяющие средства учета расхода электроэнергии, потребления газа и теплоты. В принципе такие сети могут создаваться с использованием Internet, но в производственных объединениях предпочитают закрытые корпоративные сети, а на отдельных предприятиях — локальные. Сложность создания таких систем определяется тем, что при использовании стандартных протоколов RS-232, RS-485, HART изготовители теплосчетчиков, расходомеров и других первичных средств измерения используют индивидуальные протоколы вывода числовых данных, что требует адаптации центрального вычислителя к парку используемых средств измерения.

Измерительно-вычислительный комплекс АСУТ-601 предназначен для коммерческого учета тепловой энергии и теплоносителей у производителей и потребителей тепловой энергии. Комплекс позволяет вести учет следующих сред:

- горячей и холодной воды;
- водяного пара;
- возвратного конденсата;
- подпитки;
- стоков;
- природных и технических газов.

Количество обчитываемых трубопроводов может достигать 100. Ввод сигналов от первичных преобразователей температуры, давления, разности давлений, их первичное преобразование в значение измеряемых параметров производится в теплосчетчиках, расходомерах, счетчиках газа.

Центральной частью АСУТ-601 является вычислитель на базе персонального компьютера с процессором PENTIUM-133 МГц с развитым программным обеспечением, включающим операционные системы QNX 4.25, Windows NT, MS DOS; ПО реального времени COMPLEX; базы данных реального времени; средства их генерации.

Максимальное число интерфейсных каналов RS-485 равно 24. В табл. 14.2 приведены типы подключаемых к комплексу приборов, их максимальное количество на одной линии и максимальное расстояние между прибором и вычислителем.

Для учета энергозатрат предприятий одного ведомства в пределах региона создаются корпоративные сети. В качестве примера такие сети могут быть созданы на основе программного комплекса «Взлет СП», ориентированного на приборы, выпускаемые фирмами «Взлет», «Логика» и объединяющими средства учета количества

Таблица 14.2

Средства измерений, работающие с АСУТ-601			
Тип		Максимальное количество	Максимальное расстояние, м
Теплосчетчики	СТД	32	1200
	СПТ961К	30	15000
	УВП-281	32	1500
Счетчики расхода	СПГ761	30	15000
	Гиперфлоу — ЗП с БВ-002	40	2000
	Гиперфлоу — ЗП с МАС-003	10	1200
	Взлет МР УРСВ-5ХХ	32	1200
	УФМ 005	32	1200
	УФС 00R	32	1000

газа, нефтепродуктов, теплоты и стоков, энергопотребления. Эта система, представленная на рис. 14.9, в пределах региона может объединять несколько сотен коммерческих узлов учета.

Компоненты «Взлет СП» используют объекты русской версии MS Office 2000. Объекты Excel применяются для представления электронных таблиц и графиков, Access — для подготовки отчетных документов. При построении сети приборов используются соединения типа шина и кольцо. Шинное объединение основывается на интерфейсе RS-485. Шина «Взлет» является шиной с одним ведущим абонентом, а остальные — ведомыми. Ведущий абонент (персональный компьютер) управляет передачей сообщений. Ведомый абонент даст сообщение только после получения запроса в течение заданного интервала времени. На шине используются два протокола Modbus и Vitbus, что позволяет подключать к ней приборы, использующие разные протоколы. Скорость обмена составляет от 600 до 19200 бит/с. Хотя логическая емкость шины допускает более 200 адресов, но из-за ограниченной нагрузочной способности передатчика (32 приемника) ее возможности могут быть использованы только при применении специальных повторителей.

Для объединения шин «Взлет» и маркерных шин фирмы «Логика» в единую сеть используется адаптер сетевых протоколов «Взлет АСП». Устройство имеет два разъема подключения, каждый из которых содержит цепи интерфейсов RS-232 и RS-485. Структурная схема на рис. 14.9 относится к одному из вариантов рассматриваемой системы. К шине Ethernet корпоративной сети подключены персональные компьютеры с установленным комплексом «Взлет СП». К персональному компьютеру № 3 через адаптер АПС69М подключена

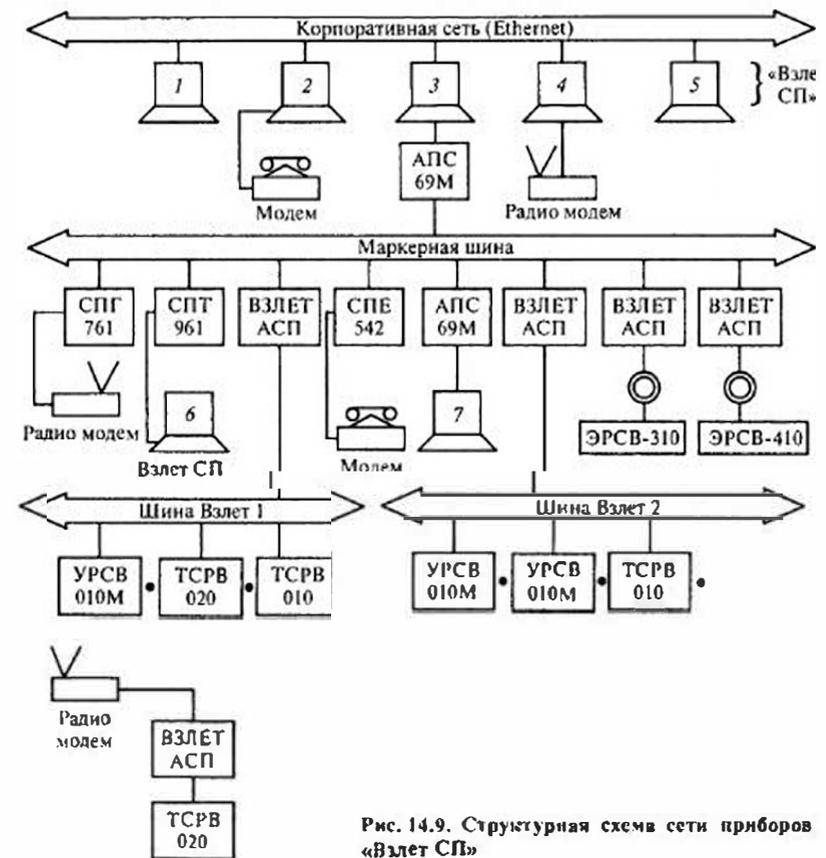


Рис. 14.9. Структурная схема сети приборов «Взлет СП»

маркерная шина, к которой через адаптеры «Взлет АСП» подключены шины «Взлет» № 1 и 2. К маркерной шине подключены счетчики газа (СПГ761), теплоты (СПТ961), электроэнергии (СПЕ542) фирмы «Логика» и через адаптер «Взлет АСП» электромагнитные счетчики расхода ЭРСВ-310 и ЭРСВ-410. К шинам «Взлет» № 1 и 2 подключены ультразвуковые расходомеры УРСВ и теплотепловычислитель ТСРВ фирмы «Взлет».

В рассматриваемом режиме работы системы, а их может быть несколько, любой из ПК получает доступ к любой из трех приборных шин через ПК № 3, через ПК № 2 по телефонным линиям через модем СПЕ542 и через ПК № 4 по радиоканалу с использованием радиомодема СПГ761. Этот же канал обеспечивает связь с одиночным теплосчетчиком ТСРВ. ПК № 6 и 7 также имеют доступ ко всем

трем шинам, причем ПК № 7 является абонентом маркерной шины, а ПК № 6 получает доступ к ней через шлюз СПТ961. Эти компьютеры работают независимо друг от друга. Если некоторые приборы «Взлет» имеют только интерфейс RS-232, то для их подключения к маркерной шине используется адаптер «Взлет АСП». Этот же адаптер обеспечивает связь шин «Взлет» с ПК, на которых установлен комплекс «Взлет СП», либо непосредственно, либо через модемы по телефонным линиям или радиоканалам.

### Контрольные вопросы

1. Проанализируйте достоинства и недостатки ультразвуковых расходомеров.
2. Охарактеризуйте способы измерения разности времени распространения импульсов в ультразвуковых расходомерах.
3. Каков принцип действия доплеровских корреляционных расходомеров?
4. Чем обусловлено возникновение вихрей Кармана?
5. Какие методы измерения частоты вихрей Кармана вы знаете?
6. Каков принцип действия массовых расходомеров?
7. Чем отличаются алгоритмы расчета отпущенной теплоты в открытых и закрытых системах теплоснабжения?
8. Какие первичные преобразователи входят в состав теплосчетчиков?
9. Какие функции выполняют теплосчетчики?
10. Как строятся системы учета отпущенной теплоты, газа, электрической энергии?

## Раздел четвертый ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

### Глава пятнадцатая ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

#### 15.1. Общие сведения о влажности газов, твердых и сыпучих тел

Влажность газов, твердых и сыпучих тел, жидких сред является одним из важных показателей целого ряда технологических процессов в металлургической, химической, пищевой, текстильной, строительной и других отраслях промышленности. Кроме того, измерение расхода отпущенного и полученного потребителями топливного газа сопровождается контролем его влажности.

Влажность воздуха и газов при технических измерениях может быть охарактеризована следующими параметрами:

- абсолютной влажностью, определяемой количеством водяного пара, содержащегося в единице объема газа,  $г/м^3$ ;
- влажностью — массой водяного пара, отнесенной к массе сухого газа,  $г/кг$ ;
- температурой точки росы — температурой, при которой газ становится насыщенным содержащимся в нем водяным паром,  $°C$ ;
- 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:

- влажностью — отношением массы влаги к массе абсолютно сухого тела;
- 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 влажностью; при

транспортировке газов по трубопроводам необходимо знать температуру точки росы, а дутье в металлургическом производстве лучше характеризовать относительной влажностью.

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. К коллоидным относятся тела типа желе, теста, повидла, 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 форм 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 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 промышленных приборах получили следующие методы измерения влажности газов и воздуха: психометрический, точки росы, сорбционный и оптический.

*Психометрический метод* измерения влажности основан на измерении психометрической разности температур между «сухим» и «мокрым» термометрами. Мокрый термометр смачивается через специальный фитиль водой. Испарение, а следовательно, и охлаждение с поверхности 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 может устанавливаться любой в интервале температур работы влагомера.

*Сорбционный метод* основан на связи физических свойств гигроскопических веществ с количеством поглощенной ими влаги, зависящей от влажности анализируемого газа.

*Оптический метод* основан на измерении ослабления инфракрасного (ИК) излучения за счет его поглощения парами воды (§ 16.5).

*Психометрический метод.* В психометрическом методе используется зависимость между парциальным давлением пара в парогазовой смеси и показаниями сухого и мокрого термометров:

$$p_{н.м} - p = Ap_6(t_c - t_m), \quad (15.1)$$

где  $p$  — парциальное давление пара в парогазовой смеси;  $p_{н.ч}$  — парциальное давление насыщенного пара при температуре мокрого термометра  $t_m$ ;  $p_6$  — барометрическое давление;  $A$  — психометрическая постоянная;  $t_c$  — температура сухого термометра.

Относительная влажность  $\phi$  может быть определена из (15.1) следующим образом:

$$\phi = p/p_{н.с} 100 = 100[p_{н.м} - Ap_6(t_c - t_m)]/p_{н.с}, \quad (15.2)$$

где  $p_{н.с}$ ,  $p_{н.м}$  — парциальное давление насыщенного пара при температурах  $t_c$  и  $t_m$ .

В связи с тем, что  $p_{н.с}$  и  $p_{н.м}$  однозначно определяются  $t_c$  и  $t_m$ , то при  $A = \text{const}$ , можно получить зависимость

$$\phi = f(t_c - t_m, t_c). \quad (15.3)$$

По этой зависимости можно составить психометрические таблицы. Таблицы могут быть различными для разных конструкций мокрого термометра. Психометрическая 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  $\phi = \text{const}$  в координатах  $t_c$ ,  $t_m$ . Полагая, что прямые  $\phi = \text{const}$  пересекаются в одной точке с координатами  $t_a$ ,  $t_b$  (рис. 15.1), можно считать,

$$\phi = f(t_c - t_a)/(t_c - t_b) \quad (15.4)$$

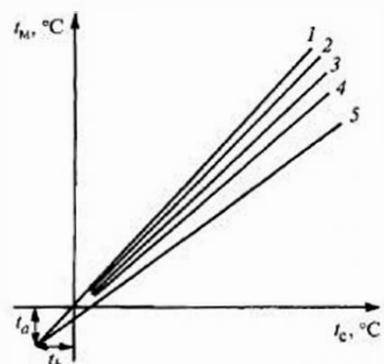


Рис. 15.1. Зависимость относительной влажности от температур «мокрого» и «сухого» термометров:

1—5 —  $\varphi = 100\%; 80; 60; 40; 20$

Принципиальная измерительная схема психрометра с преобразователями сопротивления представлена на рис. 15.2. 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

$$m = k_1(t_M - t_a) / [k_2(t_c - t_b)]. \quad (15.5)$$

Шкала психрометра градуируется в процентах относительной влажности. Возможны различные модификации этой схемы, но, как правило, принцип действия остается неизменным.

Преимущества психрометрического метода — достаточно высокая 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  $A$ .

**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 один 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, обдуваемое анализируемым газом. Зеркало необходимо охлаждать, чтобы на нем происходила конденсация влаги, находящейся

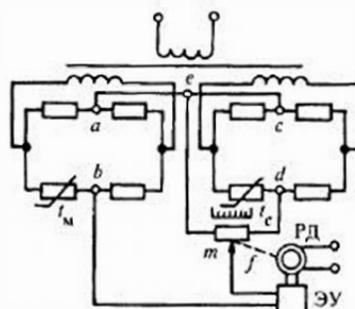


Рис. 15.2. Принципиальная схема психрометра с термопреобразователями сопротивления

в анализируемом газе. Одновременно фиксируется 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. Газ, очищенный от примесей и пыли, по каналу 1 поступает в камеру 2, где соприкасается с зеркальной поверхностью оптического канала 3, по которому световой поток от источника 4 попадает на оптрон 5.

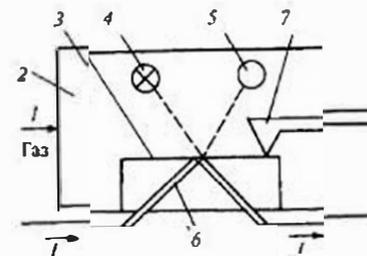


Рис. 15.3. Принципиальная схема влагомера точки росы:

1 — канал; 2 — камера; 3 — зеркальная поверхность; 4 — источник измерения; 5 — оптрон; 6 — термобатарея; 7 — термометр

Поверхность 3 охлаждается термобатареей 6, работающей на эффекте Пельтье. Принцип ее работы состоит в том, что при прохождении тока через соприкасающиеся поверхности разнородных проводников в зависимости от направления тока поглощается или выделяется тепло. Так, снижение температуры на  $50^\circ\text{C}$  может быть получено при пропускании тока в 6 А при напряжении питания 15 В через термоэлектронную батарею размером  $40 \times 40 \times 40$  мм, содержащую 127 элементов. При достижении точки росы на поверхность 3 выпадает роса, оптрон запирается и ток через термобатарею 6 прекращается. Термопара 7 фиксирует температуру выпадения росы. Преобразователь точки росы прибора «КОНГ-Прима» измеряет точку росы в диапазоне  $-30 \dots 30^\circ\text{C}$ , погрешность составляет  $\pm 0,25$  и  $\pm 1\%$ .

При практической реализации метода точки росы существуют определенные трудности. Во-первых, фиксация самого 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 вызывают коррозию поверхности, на которой происходит конденсация.

**Сорбционные влагомеры.** В сорбционных влагомерах чувствительный элемент должен находиться в гигрометрическом равновесии с измеряемым газом. В практике технических измерений

получили распространение следующие разновидности сорбционных преобразователей: электролитические, кулонометрические, пьезосорбционные и деформационные.

В *электролитических* гигрометрах измерительный преобразователь включает влажочувствительный элемент, содержащий электролит. Изменение влажности газа вызывает изменение количества влаги, содержащейся во влажочувствительном элементе, что приводит к изменению концентрации электролита во влажочувствительном элементе и соответствующему изменению его сопротивления или емкости. 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 их принцип действия отличается. 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 термопреобразователем. Электролитические гигрометры с подогревом относительно просты и надежны. Их характеристики практически не зависят от запыленности или загрязнения, скорости измеряемого газа, его давления и напряжения питания.

В *кулонометрических* преобразователях влажность газа определяют по количеству электричества, затраченного на электролиз влаги, которая поглощается частично гидротированным пентаоксидом фосфора. Измерительный преобразователь в этих приборах состоит из пластмассового корпуса, во внутреннем канале которого расположены два электрода в виде несоприкасающихся спиралей. Про-

странство между электродами заполнено частично гидратированным пентаоксидом фосфора, являющимся хорошим осушителем. Влага газа, соединяясь с гигроскопическим веществом, образует раствор фосфорной кислоты с большой удельной проводимостью. Подключенное к электродам постоянное напряжение вызывает электролиз поглощенной влаги. Количество поглощенной и разложенной воды при постоянном расходе газа одинаково и определяется концентрацией влаги в анализируемом газе.

Преимуществом кулонометрических гигрометров является независимость их показаний от напряжения питания и состава газа. Загрязнения сорбента практически не влияют на показания прибора, метод не требует градуировки на эталонных смесях и хорош для измерения микроконцентраций влаги в газах.

К недостаткам метода относится необходимость исключения паров и газов, имеющих щелочную реакцию (аммиак, амины). Их присутствие выводит из строя чувствительный элемент. На показания существенно влияют пары спиртов, которые гидролизуются на пентаоксиде фосфора с образованием воды.

В *пьезосорбционных* гигрометрах используется зависимость частоты собственных колебаний кварцевого резонатора от массы влаги, поглощенной сорбентом, нанесенным на поверхность кварцевой пластины. Изменение массы вещества на кварцевой пластине  $\Delta m$  и частоты собственных колебаний связаны выражением

$$\Delta f = \Delta m f^2 / (N \rho S), \quad (15.6)$$

где  $\rho$ ,  $S$  — плотность и площадь пластины кварца;  $N$  — частотный коэффициент.

Отношение  $f^2/(N\rho S)$  определяется свойствами пластины кварца, поэтому уравнение (15.6) принимает вид  $\Delta f = k\Delta m$ . Метрологические характеристики пьезосорбционных гигрометров определяются материалом сорбента и технологией его нанесения на поверхность кварцевой пластины. Применение в качестве сорбентов силикагеля, цеолитов, сульфированного полистирола позволяет использовать пьезосорбционный метод для измерения микроконцентраций влаги в газах. Конструкция чувствительного элемента прибора достаточно проста.

Пьезосорбционные гигрометры требуют градуировки по газовым смесям с известной влажностью. Возможны дополнительные погрешности за счет сорбирования помимо влаги других примесей анализируемого газа. Пьезосорбционные гигрометры применяются в химической промышленности и при испытаниях материалов и изделий в термобарокамерах.

Гигрометры для измерения влажности газов производятся отечественными фирмами: ИПТВ 056 (ф. «Элемер»), зарубежными фирмами: мод. 340, серия 800 (ф. Rosemount), мод. 4112 (ф. Honeywell), Dewcel (ф. Foxboro), мод. 70 (20—23, 31, 32, 51) (ф. Jumo) и др.

### 15.3. Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел

Методы измерения влажности твердых и сыпучих тел условно можно разделить на две группы: прямые методы, позволяющие определять массу влаги или сухого вещества в пробе; 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. В технических измерениях применяются исключительно косвенные методы. Из них наибольшее распространение получили электрические методы, такие как кондуктометрический, емкостной и др. Большинство промышленных материалов являются капиллярно-пористыми. В сухом виде они представляют собой диэлектрики 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 (рис. 15.4)

для капиллярно-пористых тел имеет вид

$$R = C/W^n, \quad (15.7)$$

где  $C$  — постоянная;  $W$  — влажность материала;  $C$  и  $n$  определяются для каждого материала экспериментально.

Степенная зависимость сопротивления от влажности обеспечивает высокую чувствительность кондуктометрического метода. Однако его применение ограничено большим числом влияющих величин, таких как температура, структура материала, плотность

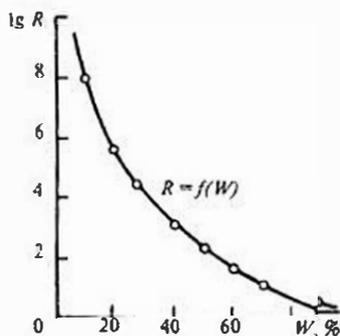


Рис. 15.4. Зависимость электрического сопротивления от влажности капиллярно-пористых тел

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  $\epsilon = 1...6$ , а у воды  $\epsilon = 81$ . Изменение диэлектрической проницаемости вследствие изменения влажности материала определяют 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 с помощью засыпки при падении материала с определенной высоты. В этом случае обеспечивается хорошая воспроизводимость результатов измерения. Емкость конденсатора определенных геометрических размеров может быть выражена формулой

$$C = k \epsilon, \quad (15.8)$$

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 цепи в приборах для измерения емкости преобразователя, а по ней 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 зависит 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 конденсатора) 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.

**Контрольные вопросы**

1. Каким образом может быть охарактеризована влажность газов?
2. Какова особенность измерения влажности твердых тел и как она может быть охарактеризована?
3. Какие методы применяются для измерения влажности газов?
4. В чем заключается психрометрический метод измерения влажности?
5. В чем заключается метод измерения точки росы?
6. В чем заключается оптический метод измерения влажности газов?
7. Каков принцип действия емкостного измерителя влажности газов?
8. Каковы методы измерения влажности твердых тел и особенности их применения?

**Глава шестнадцатая  
АНАЛИЗ СОСТАВА ГАЗОВ****16.1. Общие сведения**

Средства измерений, применяемые в различных отраслях промышленности, научных исследованиях для анализа состава газов, называются газоанализаторами. На основе непрерывного автоматического контроля состава газов осуществляется 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.п.

В последние годы в связи с усилением внимания к охране окружающей среды 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 17.2.3.01-86 для контроля за качеством воздуха населенных пунктов осуществляется периодическое измерение концентрации таких основных загрязняющих веществ, как сернистый газ, оксид углерода, оксид и диоксид 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 % 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. При измерении малых концентраций используется единица млн<sup>-1</sup> (ppm), составляющая одну часть на миллион частей анализируемого газа или 0,0001 %, и млрд<sup>-1</sup> (ppb) — одну часть на миллиард. 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 определяемых компонентов смеси, и включает следующие основные группы приборов [26]: механические, тепловые, магнитные, оптические, электрические, хроматографические и масс-спектрометрические.

Газоанализаторы в отличие от средств измерения температуры, давления представляют собой установки, содержащие кроме измерительного преобразователя (приемника) ряд устройств, обеспечивающих отбор, подготовку и транспортирование пробы газа через прибор. Наиболее распространенные типы этих устройств рассмотрены в конце главы. Для газоанализаторов характерно разделение на две группы приборов. В первую группу входят измерительные приборы, во вторую — индикаторы, сигнализаторы, детекторы утечки газов. Приборы второй группы часто являются переносными, более простыми по конструкции и имеют меньшее число вспомогательных устройств.

Основными производителями газоанализаторов в РФ и странах ближнего зарубежья являются ПО «Аналитприбор» (г. Смоленск), АО «Химлаборприбор» (г. Клин Московской обл.), фирма «Циркон» (г. Москва), ЗАО «Эконом» (г. Москва), АО «Цвет» (г. Дзержинск Нижегородской обл.), «Биоаналитические системы и сенсоры»

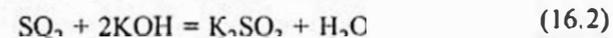
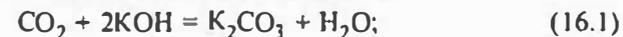
(г. Москва), з-д «Севкавзлектроприбор» (г. Нальчик), з-д «Хроматограф» (г. Москва), «Энерготест ВТИ» (г. Москва), СКБ «Хроматэк» (Иошкар-Ола), «Вырусский з-д газоанализаторов» (г. Выру Эстония), ОКБА «Хнмавтоматика» (г. Харьков Украина) и др. Из числа зарубежных фирм газоанализаторы производят Siemens, Rosemount, Honeywell, Jumo, Yokogawa, Riken Keiki Co. и др.

## 16.2. Объемные химические газоанализаторы

В механических газоанализаторах измерение содержания определяемых компонентов производится на основании изменения механических параметров состояния или соответствующих свойств газовой смеси. К числу информативных величин в этих приборах относятся изменения объема или давления пробы газовой смеси, ее вязкости, плотности, скорости распространения звука.

*Объемные химические газоанализаторы* являются наиболее распространенными приборами механического типа (волюмометрические). О содержании в них определяемого компонента судят по изменению объема газовой смеси в результате избирательного поглощения, каталитического окисления или сжигания определяемого компонента. Поскольку для избирательного удаления определяемых компонентов используются химические реакции, приборы часто называют объемными химическими газоанализаторами. С их помощью можно произвести измерение концентрации в смеси газов следующих компонентов: диоксида углерода, сероводорода, диоксида серы (сумма кислых паров и газов), кислорода, оксида углерода, водорода, непредельных и предельных углеводородов, азота.

При определении содержания CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> используется раствор щелочи, при этом протекают следующие реакции:



Для поглощения водорода и оксида углерода используется щелочной раствор полухлористой меди. Кислород поглощается щелочным раствором пирогаллола, а непредельные углеводороды — бромной водой. Водород и предельные углеводороды могут удаляться из смеси сжиганием, а оксид углерода — каталитическим окислением. Погрешность рассматриваемого метода в значительной мере определяется погрешностью измерения изменения объема, поэтому начальный и остаточный объемы пробы газа должны иметь одинаковые температуру и давление. Подавляющее большинство

газоанализаторов, основанных на этом принципе измерения, относятся к лабораторным приборам периодического действия, в которых отбор пробы и другие операции выполняются вручную.

Принцип действия объемных химических газоанализаторов рассматривается на примере газоанализатора ГХП-2 (рис. 16.1), предназначенного для измерения двух компонентов газовой смеси:  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ . Прибор включает в себя измерительную бюретку 1, соединенную с гребенкой 2, к которой подключены два поглотительных сосуда 3, 4. Сосуд 3 заполнен раствором 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. Внутри мерной бюретки находится сообщающаяся с атмосферой трубка 5, которая используется для контроля давления пробы газа после поглощения определяемого компонента. Мерная бюретка термостатирована. Отбор пробы при открытом кране 9 и прокачивание газа 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

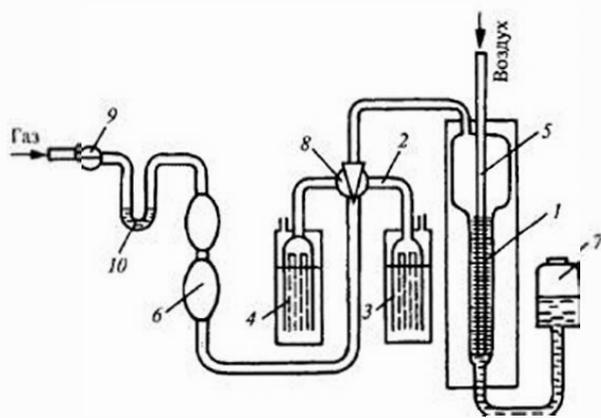


Рис. 16.1. Схема газоанализатора ГХП-2:

1 — измерительная бюретка; 2 — гребенка; 3, 4 — поглотительные сосуды; 5 — трубка; 6 — резиновая груша; 7 — напорный сосуд; 8, 9 — краны; 10 — фильтр

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.

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 [27]. 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 ( $\text{CH}_4$  и др.); суммы непредельных углеводородов ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ). Конструкция газоанализатора ВТИ отличается от ГХП-2 устройством мерной бюретки и поглотительных сосудов, их числом, наличием печи для сжигания  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ .

К числу достоинств объемного метода измерения концентраций газов относятся: возможность измерения широкого круга компонентов газовых смесей в результате подбора соответствующих поглотителей или химических реакций связывания; возможность анализа многокомпонентных газовых смесей; простота устройства.

Недостатками метода являются: низкая точность анализа (не выше  $0,1 \dots 0,2\%$  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 измерением тепловых свойств газовой смеси, зависящих от концентрации определяемого 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, отнесенных к теплопроводности воздуха. Анализ данных, приведенных в табл. 16.1, показывает, что при температуре 100 °С теплопроводности таких газов, как H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Ar, He отличаются от теплопроводности воздуха.

С ростом температуры теплопроводность газов меняется в разной степени, в связи с чем при температуре 500 °С относительная теплопроводность N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, Ar, He практически не меняется, тогда как теплопроводность CO<sub>2</sub> возрастает до единицы, а CH<sub>4</sub> — 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

$$\lambda = \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2 + \dots + \lambda_n c_n = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i c_i. \quad (16.3)$$

При анализе бинарных смесей с суммарной концентрацией неопределяемых компонентов  $c_n$ , имеющих совпадающую теплопроводность  $\lambda_n$ , согласно (16.3), теплопроводность смеси определяется выражением

$$\lambda = \lambda_n c_n + \lambda_{..} c_{..}$$

Таблица 16.1

Относительные теплопроводности газов

Газ	100 °С	500 °С	Газ	100 °С	500 °С
Воздух	1	1	Диоксид 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
Диоксид углерода	0,71	0,96	Гелий	5,56	5,32
Оксид углерода	0,94	0,93	Пары воды	0,78	1,16
Метан	1,45	2,13			

Поскольку  $c_o + c_n = 1$ , зависимость между концентрацией определяемого компонента  $c_o$  и измеряемой теплопроводностью смеси  $\lambda$  при известных теплопроводностях неопределяемых и определяемого  $\lambda_o$  компонентов имеет вид  $c_o = (\lambda - \lambda_n)/(\lambda_o - \lambda_n)$ .

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<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, водяные пары, при измерении концентрации CO<sub>2</sub> должны быть удалены SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, водяные пары. Колебания концентрации других компонентов влияют мало, 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;  $l, d$  — 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 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 платиновая спираль 3 диаметром 0,02 мм открытая (рис. 16.2, а) либо остеклованная 4 (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 имеет большую инерционность.

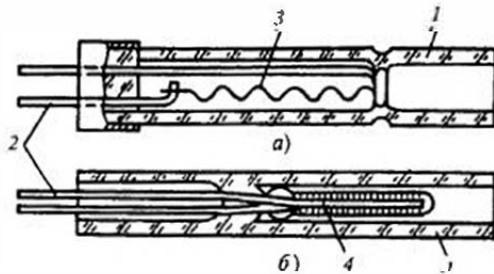


Рис. 16.2. Устройство рабочих чувствительных элементов с открытой (а) и остеклованной (б) платиновой спиралью:

1 — стеклянный корпус; 2 — платиновый токопровод; 3, 4 — открытая и остеклованная платиновые спирали

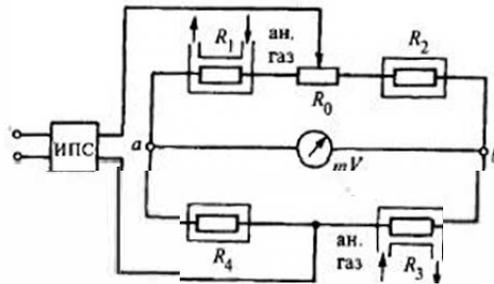


Рис. 16.3. Измерительная мостовая схема газоанализатора

Для обеспечения максимальной чувствительности по теплопроводности для  $\text{CO}_2$ , а также снижения влияния теплоотдачи за счет излучения температура платиновой спирали устанавливается  $80 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . В целях уменьшения влияния конвективного теплообмена газ к чувствительному элементу подается в результате диффузионного обмена, что увеличивает инерционность тепловых газоанализаторов.

Для измерения сопротивления проволочных 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 батареи 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 одноставовые 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 течеискатели и газоанализаторы, предназначенные для анализа содержания  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$  в топливных газах и газах производства аммиака, хлора, аргона, серной кислоты.

Одноставовой 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, включающие помимо рабочего моста мост сравнения (газоанализаторы типа ТП, ГТВ). Компенсация влияния перечисленных факторов проще осуществляется в микропроцессорных газоанализаторах.

Структурная схема микропроцессорного газоанализатора АГ0012 представлена на рис. 16.4. Рабочий мост  $I$  включает две камеры с резисторами  $R_1$ ,  $R_3$ , омываемыми анализируемым газом. Резисторы  $R_2$ ,  $R_4$  находятся в камерах, содержащих анализируемый газ с концентрацией, соответствующей нижнему пределу измерения прибора. Термопреобразователь  $R_t$  измеряет температуру прибора и анализируемого газа, тензомост  $2$  служит для измерения давления газовой смеси. Коммутатор  $K$  подает выходные сигналы перечисленных элементов на аналого-цифровой преобразователь микропроцес-

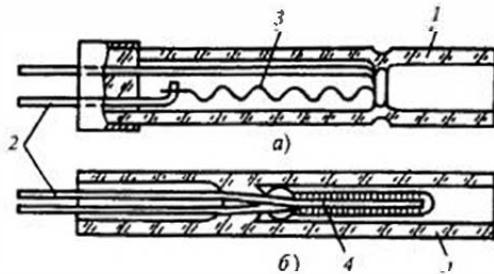


Рис. 16.2. Устройство рабочих чувствительных элементов с открытой (а) и остеклованной (б) платиновой спиралью:

1 — стеклянный корпус; 2 — платиновый токопровод; 3, 4 — открытая и остеклованная платиновые спирали

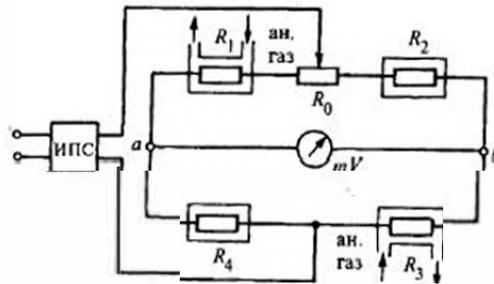


Рис. 16.3. Измерительная мостовая схема газоанализатора

Для обеспечения максимальной чувствительности по теплопроводности для  $\text{CO}_2$ , а также снижения влияния теплоотдачи за счет излучения температура платиновой спирали устанавливается  $80 \dots 100^\circ\text{C}$ . В целях уменьшения влияния конвективного теплообмена газ к чувствительному элементу подается в результате диффузионного обмена, что увеличивает инерционность тепловых газоанализаторов.

Для измерения сопротивления проволочных 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 батареи 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 одноставовые 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 течеискатели и газоанализаторы, предназначенные для анализа содержания  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , Ar,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$  в топливных газах и газах производства аммиака, хлора, аргона, серной кислоты.

Одноставовой 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, включающие помимо рабочего моста мост сравнения (газоанализаторы типа ТП, ГТВ). Компенсация влияния перечисленных факторов проще осуществляется в микропроцессорных газоанализаторах.

Структурная схема микропроцессорного газоанализатора АГ0012 представлена на рис. 16.4. Рабочий мост  $I$  включает две камеры с резисторами  $R_1$ ,  $R_3$ , омываемыми анализируемым газом. Резисторы  $R_2$ ,  $R_4$  находятся в камерах, содержащих анализируемый газ с концентрацией, соответствующей нижнему пределу измерения прибора. Термопреобразователь  $R_t$  измеряет температуру прибора и анализируемого газа, тензомост  $2$  служит для измерения давления газовой смеси. Коммутатор  $K$  подает выходные сигналы перечисленных элементов на аналого-цифровой преобразователь микропроцес-

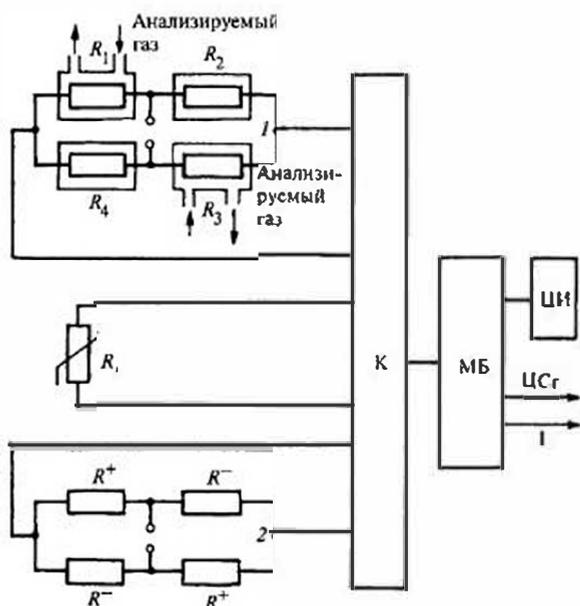


Рис. 16.4. Структурная схема микропроцессорного газоанализатора АГ-0012:

1 — рабочий мост; 2 — тензомост; К — коммутатор; МБ — микропроцессорный блок; АГ — газоанализатор; ЦИ — цифровой индикатор; ЦСг — цепь сигнализации

сорного блока МБ, в котором производится коррекция выходного сигнала газоанализатора по температуре и давлению анализируемой газовой смеси. Газоанализатор АГ-0012 при пределах измерения концентрации водорода в азоте от 0...1 до 0...100 % имеет приведенную погрешность измерения от  $\pm 4,5$  до  $\pm 2$  %. Прибор помимо цифрового индикатора ЦИ имеет на выходе токовый унифицированный сигнал и цепи сигнализации ЦСг:

Газоанализаторы по теплопроводности выпускаются многими приборостроительными фирмами мира: мод. САТ7, Hydros (ф. Rosemount), мод. 7866 (ф. Honeywell) и др.

**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  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ . Термохимические газоанализаторы используются

как сигнализаторы взрывоопасных концентраций газов, измерителей химического недожога топлива, детекторов газовых хроматографов и пр.

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 неравновешенного 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 выполнены 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, показывает наличие разности напряжений, пропорциональной концентрации определяемого компонента. Милливольтметр градуируется в единицах концентрации определяемого компонента.

Газоанализаторы первой группы в основном используются как индикаторы и сигнализаторы взрывоопасных концентраций газов и выполняются в переносном варианте, к их числу относятся сигнализаторы СГГ дозврывоопасных концентраций в воздухе таких газов как водород, метан, пропан и др. Сигнализаторы градуируются в процентах нижнего концентрационного предела взрываемости (НКПВ).

В термохимических газоанализаторах второй группы реакция окисления определяемого компонента протекает на поверхности гранулированного катализатора, в качестве которого часто используется гопкалит (60 % диоксида марганца и 40 % оксида меди). Наличие развитой поверхности катализатора обеспечивает возможность измерения концентраций определяемого компонента, составляющих доли процента. Количество выделившейся при сжигании теплоты измеряется платиновым терморезистором или батареей термопар.

### 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 газов, причем знак минус относится к диамагнитным газам [12, 26].

Сопоставление данных, приведенных в табл. 16.2, показывает, что газы, кроме кислорода, окиси и диоксида 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  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ , являющиеся продуктами высокотемпературных окислительных реакций, встречаются в малых концентрациях.

Объемная магнитная восприимчивость кислорода  $\alpha$  связана с удельной магнитной восприимчивостью  $\chi$  и плотностью  $\rho$  зависимостью  $\alpha = \chi\rho$ ; поскольку  $\chi = C/T$ , а  $\rho = pM/TR$ ,

$$\alpha = CpM/(T^2R), \quad (16.4)$$

где  $C$  — постоянная Кюри;  $p$ ,  $T$  — абсолютное давление и температура кислорода с молекулярной массой  $M$ ;  $R$  — газовая постоянная.

Таким образом, магнитная восприимчивость кислорода линейно зависит от давления и снижается с ростом температуры пропорционально  $1/T^2$ .

Таблица 16.2

Относительная объемная магнитная восприимчивость

Газ	Относительная объемная магнитная восприимчивость	Газ	Относительная объемная магнитная восприимчивость
Кислород	1	Водород	-0,0011
Воздух	0,211	Азот	-0,004
Оксид азота	0,363	Диоксид углерода	-0,0057
Диоксид азота	0,0616	Аммиак	-0,0057
Метан	-0,0123	Водяные пары	-0,004

Объемная магнитная восприимчивость смеси газов определяется соотношением

$$\alpha_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} c_i \alpha_i = c_k \alpha_k + (1 - c_k) \alpha_n, \quad (16.5)$$

где  $c_i$ ,  $\alpha_i$  — объемные концентрации компонентов газовой смеси и их объемные магнитные восприимчивости;  $c_k$ ,  $\alpha_k$  — объемная концентрация кислорода и его магнитная восприимчивость;  $\alpha_n$  — усредненная магнитная восприимчивость неопределяемых компонентов. В соответствии с (16.5), поскольку  $\alpha_n \ll \alpha_k$ , 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 движение кислородосодержащего газа в неоднородном магнитном и тепловом полях. Основанные на этом эффекте газоанализаторы выполняются с одномотовой или двухмотовой измерительными схемами.

На рис. 16.5 представлены схема чувствительного элемента, применяемого в газоанализаторах типа МН, ГТМ (рис. 16.5, а), 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 токовводам 4. Наружный диаметр чувствительного элемента составляет 0,5...0,6 мм, сопротивление резистора 40 Ом. Кислородосодержащий газ, протекающий по трубке 7, втягивается в магнитное поле, при этом он нагревается от резистора  $R_1$  и его магнитная восприимчи-

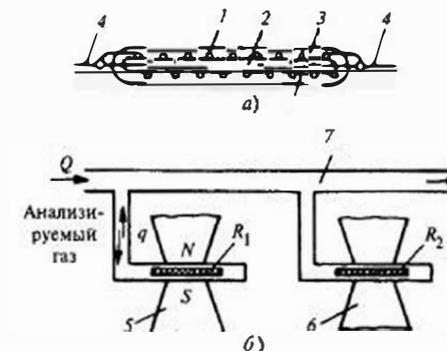


Рис. 16.5. Схема чувствительного элемента кислородомера (а) и преобразователя с внешней магнитной конвекцией (б):

1 — платиновая проволока; 2 — стеклянный капилляр; 3 — стеклянное покрытие; 4 — токоввод; 5 — постоянный магнит; 6 — немагнитный медный блок; 7 — труба

вость 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  $b$ , имеющего ту же конфигурацию, что и постоянный магнит  $S$ . На рис. 16.5,  $b$  направления тепловой и магнитной конвекции совпадают, при размещении крышки с линиями подвода газа 7 под магнитом направления конвекций становятся встречными.

В газоанализаторах МН используется двухмостовая измерительная схема, представленная на рис. 16.6. В первичном преобразователе (приемнике) размещены два моста, питаемых от вторичных обмоток 1, 2 силового трансформатора Тр. Мост I 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.

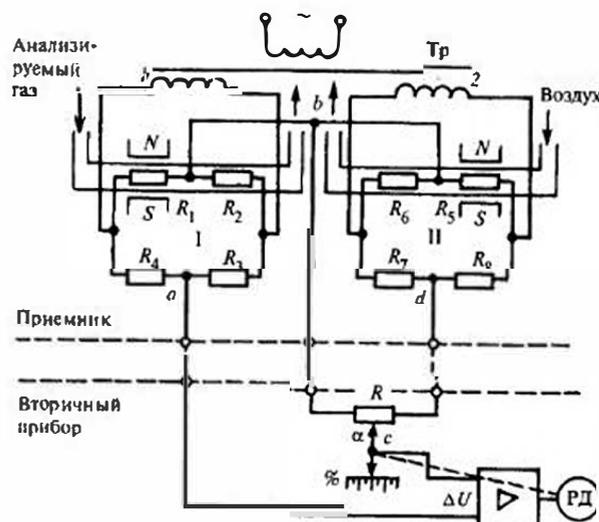


Рис. 16.6. Схема автоматического магнитного газоанализатора типа МН:

1, 2 — вторичные обмотки силового трансформатора Тр

При наличии кислорода в смеси газов мост I работает в неравновесном режиме и напряжение в измерительной диагонали  $U_{ab}$  зависит от концентрации кислорода. Для проверки начальной точки шкалы вторичного прибора присмик 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 не показанный на схеме переменный резистор начальной балансировки, аналогичный резистору  $R_0$ , входящему в мост 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 манганиновой проволоки. Поскольку концентрация кислорода в воздухе является стабильной, мост II развивает 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 небаланса моста сравнения  $U_{bd}$ , 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 имеют при нулевом нижнем пределе измерения верхние от 1 до 100%, при этом предел приведенной погрешности 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 от 0,5...1,5 мин.

В микропроцессорных кислородомерах АГ-0011 используется одномостовая измерительная схема. Для компенсации влияния тем-

пературы, давления и изменения теплопроводности компонентов газовой смеси используются три моста, плечи которых включают соответственно термо-, тензо- и термокондуктометрические преобразователи. Кислородомер имеет на выходе цифровое табло, токовый унифицированный сигнал и цепи сигнализации. При диапазонах измерения, совпадающих с представленными выше, предел приведенной погрешности меняется от  $\pm 2$  до  $\pm 5\%$  для минимального диапазона измерения. С использованием парамагнитных свойств выпускаются микропроцессорные кислородомеры: Oximat 6 (ф. Siemens), Oxinos, мод. 755 (ф. Rosemount) и др.

Благодаря резкому отличию магнитной восприимчивости кислорода от восприимчивости других газов не требуется предварительного удаления неопределяемых компонентов. Тем не менее в целях 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.

## 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.п. Наиболее распространенными являются четыре группы оптических газоанализаторов: инфракрасного и ультрафиолетового поглощения; фотоколориметрические; люминесцентные; ослабления видимого излучения. 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. Из перечисленных типов газоанализаторов наиболее распространенными являются недисперсионные инфракрасные фотометры (NDIR).

**Газоанализаторы инфракрасного и ультрафиолетового поглощения.** Каждый газ характеризуется определенным спектром поглощения. Газы, содержащие в своем составе два и более разнородных атомов, такие как  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  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 концентрацией  $c$  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  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  изображены на рис. 16.7. Спектры  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  частично перекрываются.

Схема одного из вариантов приемника инфракрасного излучения представлена на рис. 16.8. Источником  $I$  создается постоянное излучение, которое с помощью вращающегося диска с отверстиями (обтуратора) 2 и светофильтра 3 преобразуется в пульсирующее монохроматическое излучение. Анализируемый компонент, находящийся в камере 4, поглощает излуче-

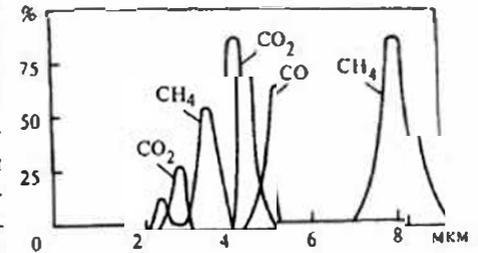


Рис. 16.7. Спектры поглощения  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  в инфракрасной области

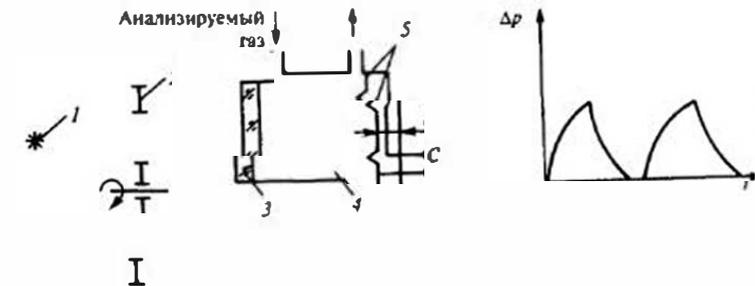


Рис. 16.8. Принципиальная схема оптико-акустического лучеприемника: 1 — источник; 2 — диск с отверстиями; 3 — светофильтр; 4 — камера; 5 — чувствительный элемент

ние, 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 из-за колебаний зазора  $\delta$  изменения емкости конденсатора  $C$ . Подобного типа преобразователи входят в состав анализаторов недисперсионного инфракрасного излучения (NDIR). Рассмотрим принцип действия микропроцессорного газоанализатора ULTRAMAT6 ф. Siemens, предназначенного для измерения концентраций газов, имеющих спектры поглощения в области длин волн 2...9 мкм, таких как  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и другие углеводороды. Газоанализатор помимо цифрового индикатора имеет интерфейс RS-485 и может иметь плату для подключения к высокоскоростной полевой шине Fieldbus.

Прибор содержит газовую и электронную части. Схема первой представлена на рис. 16.9. Поток инфракрасного излучения от источника 1 проходит через светофильтр 2 и делится светоделителем 3 на два потока: анализируемый 4 и эталонный 5. Светоделитель 3 является также фильтровой камерой, заполненной неопределяемым компонентом со спектром поглощения, частично перекрывающим спектр поглощения анализируемого газа. Потoki 4, 5 попадают соответственно в камеру 6, заполненную газом и азотом; 8 — измерительная камера; 9 — датчик микропотока; 10 — оптический соединитель; 11 — заслонка; 12 — обтюратор

После этих камер потоки попадают

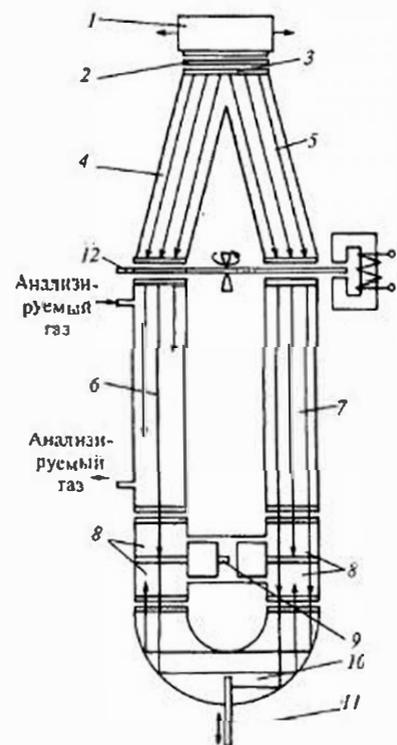


Рис. 16.9. Схема оптических каналов газоанализатора ULTRAMAT:

1 — источник света; 2 — светофильтр; 3 — светоделитель; 4, 5 — анализируемый и эталонный потоки; 6, 7 — камеры, заполненные газом и азотом; 8 — измерительная камера; 9 — датчик микропотока; 10 — оптический соединитель; 11 — заслонка; 12 — обтюратор

в измерительную камеру 8, содержащую секции каждого канала, разделенные по высоте на две части.

Центры пучков излучения поглощаются в верхней части измерительной камеры, края — в верхней и нижней. Верхние и нижние части секций соединены датчиком микропотока 9, который представляет собой мост, состоящий из двух выполненных в виде решетки никелевых резисторов, нагретых до температуры 120 °С, и двух постоянных. При постоянном потоке излучения 5, попадающем в правую часть измерительной камеры 8, поток, попадающий в левую часть, зависит от концентрации определяемого компонента. Разница давлений в секциях измерительной камеры 8 приводит к появлению микропотока газа, вызывающего изменение теплоотдачи от никелевых резисторов 9, и как следствие, изменение их сопротивления и выходного сигнала моста.

Оптический соединитель 10 удлиняет оптический канал нижней части измерительной камеры 8. Изменением положения заслонки 11 производится начальная балансировка оптических каналов. Для создания пульсаций светового потока используется обтюратор 12. Рассматриваемая конструкция сенсора ИК излучения обеспечивает узкую полосу спектральной чувствительности и отсутствие влияния на показания изменения концентрации неопределяемых компонентов.

ULTRAMAT6 может анализировать до четырех газовых смесей. Пределы измерения  $\text{CO}$  составляют 0...10 ppm, а  $\text{CO}_2$  0...5 ppm, расход газа лежит в пределах 12...90 л/ч. Погрешность выходного сигнала находится в пределах  $\pm 0,5\%$  при недельном уходе начального сигнала и диапазона  $\pm 1\%$ . Приборы этого типа включает система NGA 2000, серия 800, BINOS NDIR ф. Rosemount.

Существуют модификации ИК анализаторов для измерения  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  в дымовых и выхлопных газах, в которых производится прямое просвечивание потока газа: с одной стороны находится источник ИК излучения, а с другой — приемник.

Большинство газов и паров способны поглощать ультрафиолетовое (UV) излучение, однако ограниченное их число обладают 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 применяются фоторезисторы, вакуумные фотоэлементы и фотоумножители.

Приборы этого типа входят в систему NGA2000, к ним относятся ETL 9100, мод. 2100 фирмы Rosemount.

**Фотокolorиметрические\* газоанализаторы.** В фотокolorиметрических 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.

Фотокolorиметрический 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 контроля состояния воздушного бассейна, они измеряют концентрацию в воздухе таких вредных примесей, как NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S [28]. Приборы имеют верхний предел измерения от 0,5 до 50 мкг/л в зависимости от анализируемого компонента. Поскольку фотокolorиметрические приборы чаще используются для анализа состава жидкостей, их принцип действия подробно рассматривается в § 17.8.

К оптическим методам анализа относятся методы, использующие различные виды люминесценции. Люминесценция представляет собой холодное свечение, вызываемое светом (фотолюминесценция, флюоресценция), электрическим полем (электролюминесценция), химическими реакциями (хемилюминесценция). Последняя используется в газоанализаторах для измерения концентрации оксида и диоксида азота в газовых смесях.

Структурная схема газоанализатора типа «Клен» представлена на рис. 16.10. В реакционной камере КР оксид азота окисляется озоном. Реакция сопровождается свечением, интенсивность которого зависит от концентрации NO. Излучение попадает на фотозлектронный умножитель, входящий в блок электронно-оптического преобразователя. Если анализируемый газ через клапан К<sub>1</sub> поступает в реакцион-

\* ) От слова colour (англ.) — цвет, краска.

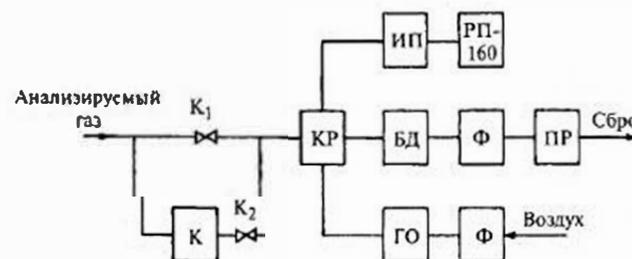


Рис. 16.10. Структурная схема газоанализатора типа «Слеп»:

КР — реакционная камера; К — клапан; Ф — фильтр; ГО — генератор озона; ПР — побудитель расхода; БД — блок дожига озона; ИП — измерительный преобразователь; РП — регистрирующий прибор

ную камеру, то измеряется концентрация NO. Для измерения концентрации NO + NO<sub>2</sub> анализируемый газ пропускается через конвертер К, в котором при температуре 800 °C NO<sub>2</sub> восстанавливается до NO.

Для получения озона воздух проходит через фильтр очистки Ф и генератор озона ГО. Расход через прибор анализируемого газа и воздуха создается побудителем расхода ПР. Из реакционной колонки газовая смесь до сброса в атмосферу пропускается через блок дожига озона БД и фильтр. Сигнал электронно-оптического преобразователя поступает на измерительный преобразователь ИП, выходной токовый сигнал которого регистрируется автоматическим миллиамперметром РП-160. Минимальный диапазон измерения прибора составляет 0...100 мг/м<sup>3</sup>, погрешность в зависимости от модификации составляет ±12; ±20 %. Аналогичный принцип действия применяется в анализаторах модели 955 (ф. Rosemount), имеющих диапазоны измерения от 10 до 1000 ppm.

Для измерения концентрации SO<sub>2</sub> используется явление флюоресценции молекул под влиянием ультрафиолетового излучения. Автоматизированная система контроля загрязнения атмосферы АСКЗА включает приборы для измерения концентрации CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, основанных на явлениях хемилюминесценции и флюоресценции.

Ослабление светового потока за счет его поглощения и рассеивания взвешенными частицами, находящимися в газе, применяются для измерения содержания золы в уходящих газах котлоагрегатов, для контроля запыленности воздуха в производственных помещениях и содержания в нем частиц влаги. В этих приборах производится

просвечивание слоя или потока газа, при этом может измеряться как ослабленный частицами прямой поток, так и отраженный, последнее используется реже. Источником света служат, как правило, лампы накаливания, излучение воспринимается фотозементами, фоторезисторами или фотоумножителями. Измеритель задымленности газового потока ИЗА производит прямое просвечивание потока и может измерять задымленность в газоходах шириной от 1 до 10 м. Пределы измерения оптической плотности составляют 0—2 при пределе приведенной погрешности  $\pm 2\%$ .

## 16.6. Электрические газоанализаторы

В электрических газоанализаторах концентрация того или иного компонента определяется по изменению электрических свойств газовой смеси или жидкости, с которой прореагировал определяемый компонент. К числу наиболее распространенных электрических газоанализаторов относятся электрохимические, применяемые для измерения микроконцентраций токсичных газов и кислорода (циркониевые), содержащихся в воздухе и дымовых газах, определения концентрации загрязняющих примесей при производстве чистых газов.

К электрохимическим газоанализаторам относятся устройства, в которых выходной сигнал определяется электрохимическими явлениями, происходящими в электродных системах, погруженных в анализируемый газ или контактирующий с ним раствор. Электрохимические методы в основном используются для анализа жидкостей, в связи с чем такие наиболее распространенные разновидности этого метода, как кондуктометрический и потенциометрический, будут рассмотрены в следующей главе. Для анализа газов чаще используются амперометрические, кулонометрические и электрохимические анализаторы [29, 30, 31].

**Амперометрические (вольтамперометрические) газоанализаторы.** Если в раствор электролита погружены два электрода, к которым приложена разность напряжений от внешнего или внутреннего источника ЭДС, то во внешней цепи потечет ток, обусловленный движением ионов в растворе. При этом у поверхности электродов собираются ионы противоположного знака, создавая внутри раствора разность напряжений  $U$ , направленную встречно действующему в цепи напряжению  $E$ . Ток в цепи  $I = (E - U)/R$ , где  $R$  — сопротивление раствора;  $U$  — разность внутренних потенциалов анода

и катода. Приборы называются гальваническими, если действующее в цепи напряжение  $E$  создается внутренним источником.

В амперометрических 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 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  $I$  в растворе определяется соотношением

$$I = nFSD(\partial c/\partial x)_{x=0}, \quad (16.6)$$

где  $n$  — число переносимых электронов;  $F$  — число Фарадея;  $S$  — площадь электрода;  $D$  — коэффициент диффузии;  $(\partial c/\partial x)_{x=0}$  — 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

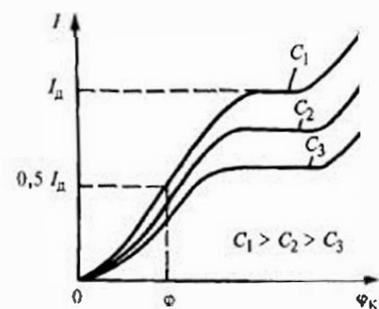


Рис. 16.11. Графики поляризационных кривых

кривой, представленный на рис. 16.11, имеет форму волны. Полуволновой потенциал, соответствующий половине диффузионного тока, не зависит от концентрации и является характеристикой деполяризатора. Таким образом, в амперометрических газоанализаторах протекающий во внешней цепи ток, являющийся выходным сигналом анализатора, однозначно определяется концентрацией измеряемого газа.

Если в качестве измерительного электрода используется ртуть, то 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  $\text{SO}_2$  в технических газах для исключения влияния кислорода в качестве поляризованного электрода используется анод, на котором  $\text{SO}_2$  окисляется с образованием серной кислоты.

В последние годы, благодаря созданию электролитических ячеек, реагирующих на различные газы, амперометрические газоанализаторы получили широкое распространение для анализа уходящих газов электростанций, промышленных предприятий, двигателей внутреннего сгорания. Так система микропроцессорного контроля КГА-8С осуществляет измерение в составе газовой смеси концентраций  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ . Содержание  $\text{SO}_2$  определяется в диапазоне 0...400 и 400...4000 ppm с погрешностью  $\pm 10\%$  и  $\text{NO}_x$  в пределах 0...100 и 100...1000 ppm с погрешностью  $\pm 5\%$ . Система производит расчет концентрации  $\text{CO}_2$  и коэффициента избытка воздуха в топке.

Аналогичный принцип действия имеют газоанализаторы типа ROXGP (ф. Rosemount), мод. 703M, 703D (ф. Honeywell).

**Кулонометрические газоанализаторы** основаны на измерении количества электричества, израсходованного при электролизе. Согласно закону Фарадея для выделения при электролизе количества вещества  $G$  необходимо через раствор пропускать ток  $I$  в течение времени  $t$  [26, 29, 31], т.е.

$$G = MI/n(96492 n),$$

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 концентраций 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  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_3$ .

В настоящее время выпускается гамма анализаторов, использующих твердотельные чувствительные элементы. На основе микроэлектронной технологии разработаны полевые транзисторы, в которых металлический затвор заменен веществом, чувствительным к определяемому компоненту. В зависимости от его концентрации меняется проводимость исток-сток полевого транзистора. Использование твердотельных чувствительных элементов позволяет осуществить выпуск малогабаритных комбинированных приборов, предназначенных для измерения  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_2$  в дымовых газах.

**Циркониевые кислородомеры.** Широкое распространение получили электрохимические кислородомеры с использованием диоксида циркония. Их преобразователь представляет собой две камеры, разделенные между собой мембраной из диоксида циркония. При температуре 550...570 °С на мембране возникает разность потенциалов, зависящая от содержания кислорода в каждой из камер. Напряжение снимается с платиновых электродов, находящихся на обеих поверхностях мембраны. В одну камеру подается анализируемый газ, а в другую — воздух. Преобразователь выполняется в виде зонда,

который вводится в газодход котла или любой поток газов. Указанный уровень температур поддерживается автоматически с помощью электрических нагревателей. К числу таких кислородомеров относятся АКТВ (ф. «Аналитприбор» г. Смоленск), ТДК-3М (ф. «Циркон» г. Москва). Пределы измерения АКТВ составляют 0,1...2 (5; 10) % при погрешностях соответственно  $\pm 0,08$ ; 0,2; 0,4 %.

К этой группе приборов относятся кислородомеры Oxmitter 4000, ОСХ 4400 (ф. Rosemount), ZR, ОХ 100 (ф. Yokogawa) и др.

Отечественной и зарубежной промышленностью выпускаются многоканальные микропроцессорные системы газового контроля, включающие рассмотренные газоанализаторы и предназначенные соответственно для определения состава уходящих газов ТЭС, доменных печей и конвертеров, отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, колошниковых газов. С помощью этих систем производится контроль утечек горючих и токсичных газов на тепловых электростанциях и промышленных объектах.

## 16.7. Хроматографические газоанализаторы

Хроматографические газоанализаторы предназначены для анализа многокомпонентных газовых смесей, состава жидкостей и твердых тел. Хроматографы являются приборами периодического действия, более сложными по устройству, чем рассмотренные 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 °С и выше. К числу преимуществ этого метода относится также высокая чувствительность (достигающая при использовании ионизационных детекторов  $10^{-11} \dots 10^{-12}$  г/см<sup>3</sup>) в сочетании с малым объемом отбираемой пробы, сравнительно высокой точностью и малым временем анализа [32—36].

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, обусловленные процессом разделения смеси на компоненты: газоадсорбционный, газожидкостный и капиллярный. Последний является разновидностью газожидкостного способа разделения.

Принципиальные схемы хроматографа и разделения смеси газов в колонке представлены на рис. 16.12. Из баллона 1 газ-носитель поступает в хроматограф. Для поддержания в процессе работы постоянной скорости газа-носителя 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 сорбента с большей скоростью движутся наименее сорбируемые газы. Поэтому в пробе смеси газов (рис. 16.12, б),

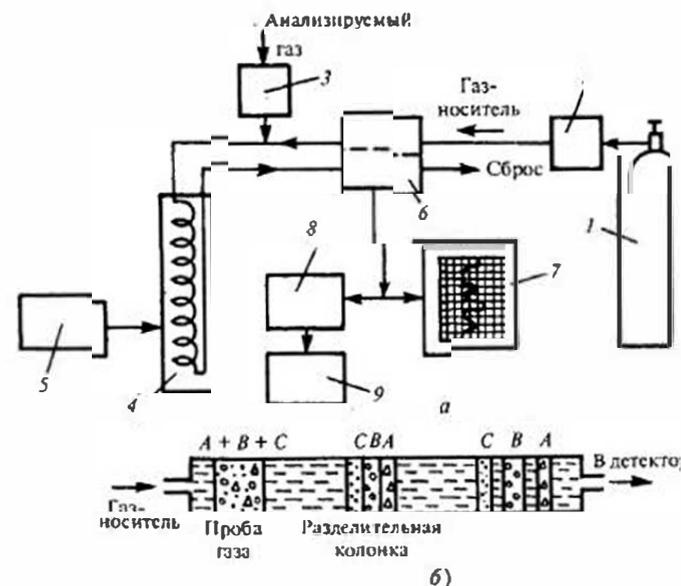


Рис. 16.12. Принципиальная схема газового хроматографа:

1 — баллон; 2 — регулятор; 3 — дозатор; 4 — разделительная колонка; 5 — терморегулятор; 6 — детектор; 7 — регистрирующий прибор; 8, 9 — микропроцессорное и цифровое печатающее устройства

содержащей три компонента *A*, *B* и *C*, первым выносятся наименее сорбируемый газ *A*, а последним — хорошо сорбируемый *C*. 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 *б*. 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 колонки может меняться с помощью терморегулятора *5* с программным управлением. Выходной сигнал детектора *б* подается на регистрирующий прибор *7*, микропроцессорное *8* и цифровпечатывающее *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 микропроцессорного измерительного устройства с соответствующим интерфейсом обеспечивает автоматический анализ хроматографического разделения и позволяет ввести информацию о составе газов в АСУ ТП.

Хроматограмма (рис. 16.13) является носителем как качественной информации о виде компонентов смеси, так и количественной —

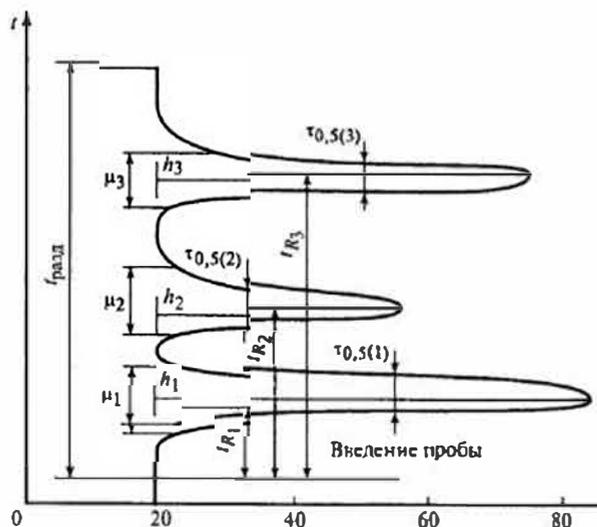


Рис. 16.13. Хроматограмма разделения смеси трех компонентов

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 объемной скорости газа-носителя  $u$ , является удерживаемый объем газа-носителя  $V_R = t_R u$ .

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 основания —  $\tau$ ,  $\mu$  или на половине высоты —  $\tau_{0,5}$ ,  $\mu_{0,5}$ . Отношение к последним величинам времени удерживания характеризует эффективность хроматографической колонки:

$$N = 5,545(t_R/\tau_{0,5})^2 = 5,545(l/\mu_{0,5})^2.$$

Эффективность разделения двух компонентов газовой смеси определяет такой показатель, как степень разделения

$$R = (t_{R1} - t_{R2}) / (\tau_{0,51} + \tau_{0,52}).$$

Порог чувствительности хроматографа рассчитывается по формуле  $\Delta = 2acVu/(QS)$ , где цифра  $2a$  — удвоенная амплитуда высокочастотных колебаний нулевой линии хроматографа;  $c$  — концентрация определяемого компонента;  $V$  — объем дозы;  $u$  — скорость движения диаграммной ленты;  $Q$  — расход газа 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.

Особенность хроматографического метода анализа — влияние на результаты измерения большого числа взаимосвязанных параметров:

1) характеризующих работу разделительной колонки (длина, диаметр, форма), материал колонки, природа сорбента, его пористость, зернение, характер набивки, толщина жидкой пленки, температурный режим колонки;

2) связанных с газом носителем: природа и наличие примесей, скорость и давление;

3) связанных с работой дозатора: объем пробы, его стабильность, способ ввода пробы;

4) связанных с работой детектора: чувствительность, инерционность, линейность градуировочной характеристики, стабильность;

5) обусловленных способом регистрации выходного сигнала детектора и методом обработки хроматограммы: 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.

## 16.8. 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...6 м. Длина колонок капиллярных хроматографов достигает 350 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 2...4 мм. В капиллярных хроматографах, в которых жидкий сорбент наносится непосредственно на внутреннюю поверхность трубки, их внутренний диаметр составляет 0,2...0,4 мм.

Колонки изготавливаются из металлических, стеклянных и фторопластовых трубок, последние используются при комнатных температурах разделения газов. При этих температурах производится разделение в газоадсорбционной хроматографии, в газожидкостной широко используется программированное изменение температуры.

В качестве неподвижной фазы в газоадсорбционной 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, полиэтилен-гликоль.

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 колонки, 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 с термохимическими 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 его можно использовать при работе с длинными колонками. Недостатком водорода являются взрывоопасность и восстановительные свойства, которые усложняют работу чувствительных элементов детекторов. Средние скорости газа в наса-

дочных 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...1) · 10<sup>5</sup> 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 ввести 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 хроматографов 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.

**Детекторы,** являясь измерительной частью хроматографа, оказывают существенное влияние на результаты анализа, поскольку чувствительность детектора — фактор, обуславливающий работу остальных элементов установки и определяющий возможности хроматографа. В табл. 16.3 для наиболее распространенных детекторов приведены порог чувствительности и анализируемые вещества.

К числу наиболее простых относятся *детекторы по теплопроводности* (ДТП, англ. TCD), хотя по чувствительности они значительно

Таблица 16.3

Порог чувствительности детекторов газовых хроматографов

Детектор	Порог чувствительности, г/см <sup>3</sup>	Анализируемое вещество
По теплопроводности	2 · 10 <sup>-8</sup> (по пропану)	Универсального назначения, органические и неорганические вещества
Термохимический	10 <sup>-8</sup> (по бутану)	Горючие вещества
Пламенно-ионизационный	5 · 10 <sup>-11</sup> (по пропану)	Органические горючие вещества
Ионизационные различных типов	10 <sup>-11</sup> ...10 <sup>-12</sup> (по воздуху)	Органические вещества

уступают ионизационным. По принципу действия эти детекторы аналогичны тепловым газоанализаторам (§ 16.3). В связи с тем, что в процессе работы хроматографа свойства газа-носителя могут изменяться, в детекторах указанного типа вводятся плечи сравнения, омываемые газом-носителем.

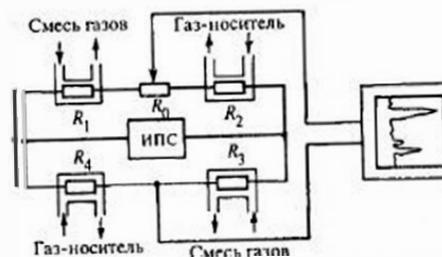


Рис. 16.14. Принципиальная схема детектора по теплопроводности (катарометра)

Принципиальная схема газового детектора по теплопроводности (катарометра) приведена на рис. 16.14. 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 содержания CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> в продуктах горения.

**Пламенно-ионизационные детекторы** (ПИД, англ. FID) основаны на измерении сопротивления пламени водорода при введении в него компонентов анализируемой смеси. Пламя чистого водорода обладает большим сопротивлением, а его температура достигает 800...900 °С. 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 детектор входит в состав большинства отечественных и зарубежных хроматографов.

К группе ионизационных относятся *аргоновый* и гелиевый детекторы, детектор по захвату электронов (ЭЗД) и др. Эти детекторы включают источник β-излучения, в качестве которого часто используется тритий. В аргоновом 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: временем удерживания, площадью пика или его высотой — устанавливается при градуировке хроматографа. Для ее проведения используются три метода: абсолютный, внутренней нормализации и внутреннего стандарта.

**Абсолютный метод.** 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.

**Градуировка по методу внутренней нормализации.** Градуировочный коэффициент определяется для одного чистого вещества, для других коэффициенты рассчитываются по соотношению свойств газов, например теплопроводностей, используемых в детекторе.

**Метод внутреннего стандарта.** Введение в градуировочную смесь стандартного вещества используется для расчета учитывающих конкретные условия работы хроматографа поправок к паспортным градуировочным коэффициентам.

## 16.9. 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.

Промышленность РФ и ближнего зарубежья выпускает ряд лабораторных хроматографов: серия «Цвет», «Газохром», «Микрохром», «Биохром», ЛХМ-80, ХГ-1, «Вырухром», «Кристалл», «Милюхром» и др. К группе промышленных хроматографов относятся следующие отечественные и зарубежные хроматографы: ХПА, ХТМ, «Нефтехим-СКЭП», «Микрохром-1», RGC 202 (ф. Siemens), mod. 7750 (ф. Rosemount), SGC3000 (ф. Honeywell), GC1000.MARK II (ф. Yokogawa) и др.

Хроматограф «Газохром 3101» относится к числу специализированных и предназначен для экспрессного определения концентрации  $O_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и углеводородов до  $C_4$  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. 16.15, а. Хроматограф является двухпоточным с газами-носителями воздухом и аргоном. Детектор 1 является комбинированным. Плечо  $R_2$  представляет собой термохимический элемент, реагирующий на выделение теплоты при реакции каталитического окисления горючих компонентов. Плечо  $R_3$  реагирует на изменения теплопроводности газа. Остальные плечи моста включают постоянные манганиновые сопротивления  $R_1$ ,  $R_4$ . Сигнал небаланса детектора, питаемого от источника стабилизированного питания ИПС, подается на самопишущий потенциометр 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

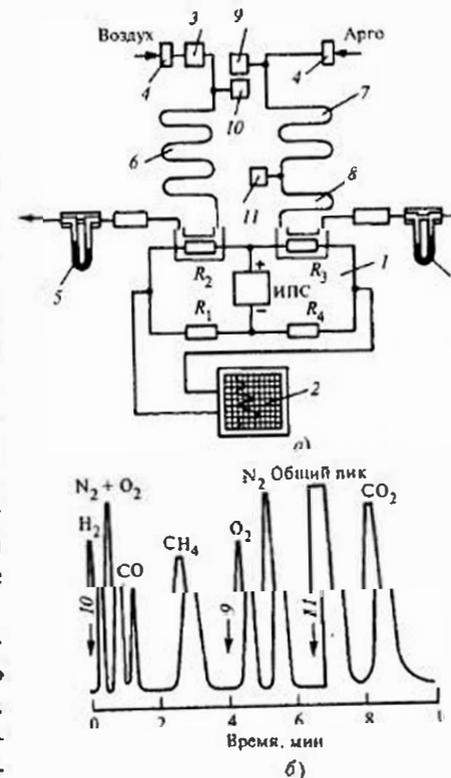


Рис. 16.15. Принципиальная схема (а) и образец хроматограммы (б) хроматографа «Газохром-3101»:

1 — детектор; 2 — самопишущий потенциометр; 3 — микрокомпрессор; 4 — фильтр-осушитель; 5 — реометр; 6—8 — разделительные колонки; 9—11 — точки ввода проб дозатором

газа-носителя в обоих каналах контролируется реометрами 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 используются в колонках 6, 8 активированный уголь, в колонке 7 — молекулярные сита. Колонка, не показанная на рисунке, заполнена силикагелем. Ввод пробы дозатором осуществляется в точки 9—11.

Указанная на рис. 16.15, а 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 — аргон. Расход каждого из газов составляет  $80 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Для определения  $H_2$ ,  $CO$  и  $CH_4$  проба с предварительно удаленным  $CO_2$  подается в точку 10. Поскольку при этом анализе  $N_2$  и  $O_2$  не разделяются, проба вводится в точку 9. Для измерения содержания  $CO_2$  проба газа вводится в точку 11. Примерный вид хроматограммы представлен на рис. 16.15, б. В зави-

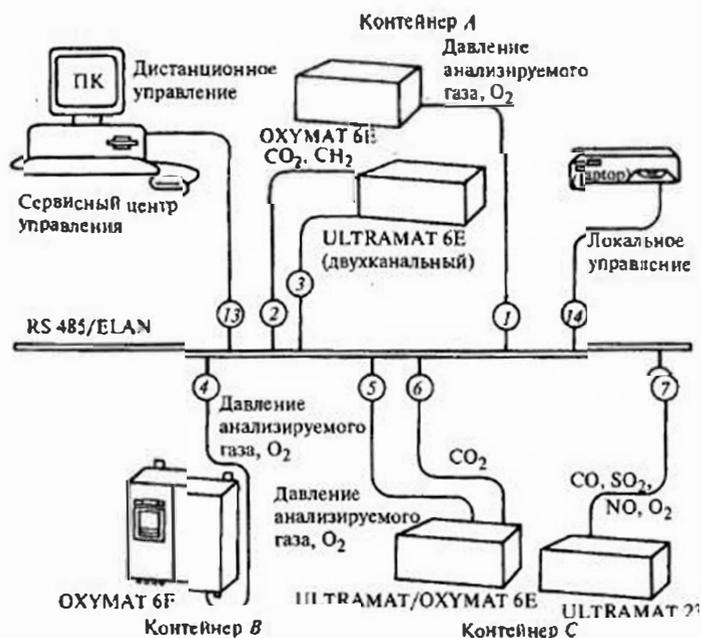


Рис. 16.16. Сеть газоанализаторов фирмы Siemens на базе RS-485:

1—12 — каналы газоанализаторов; 13, 14 — каналы персонального компьютера и контроллера

симости от анализируемых газов компоновка разделительных колонок может меняться.

Скомпонованные вместе рассмотренные газоанализаторы обеспечивают промышленный контроль различных составляющих газов. Так многофункциональная система NGA 2000 (ф. Rosemount) объединяет анализаторы парамагнитные, электрохимические, недисперсионные инфракрасные, недисперсионные ультрафиолетовые, хемилюминесцентные, пламенно-ионизационные и хроматографические.

Вариант объединения газоанализаторов фирмы Siemens в сеть с использованием интерфейса RS-485 показан на рис. 16.16. К шине ELAN (экономичная локальная рабочая сеть) подключены два анализатора кислорода OXYMAT, два ИК анализатора ULTRAMAT на  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO$  и комбинированный анализатор ULTRAMAT/OXYMAT.

## 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 подходящей для усредненного состава 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 измеряемую 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 с помощью термоманнитного газоанализатора топочных газов на содержание  $O_2$ , характеризующего избыток подаваемого в топку воздуха, отбор пробы производится из трубы, шунтирующей конвективную поверхность нагрева. Газы в трубу поступают после пароперегревателя, а возвращаются в газопровод после

воздухоподогревателя. В этом случае подсосы воздуха, имеющие место в конвективных поверхностях нагрева, не влияют на состав анализируемого газа. Измерение указанного параметра упрощается при использовании циркониевого электрохимического кислородомера, вводимого в виде зонда в газоход котла после пароперегревателя.

Для подготовки пробы газа и ее транспортировки через газоанализатор применяются вспомогательные устройства, которые 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. 16.17 представлена схема установки приемника термоманнитного кислородомера.

Наиболее распространенным устройством, служащим для отбора пробы, является керамический фильтр 1. Он вводится в поток газа, имеющего температуру до 500 °С, содержание пыли до 20 г/м<sup>3</sup>, и может обеспечить расход газа через установку до 0,8 л/мин. При использовании водяного охлаждения фильтра температура газов в точке отбора может достигать 1700 °С. 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.

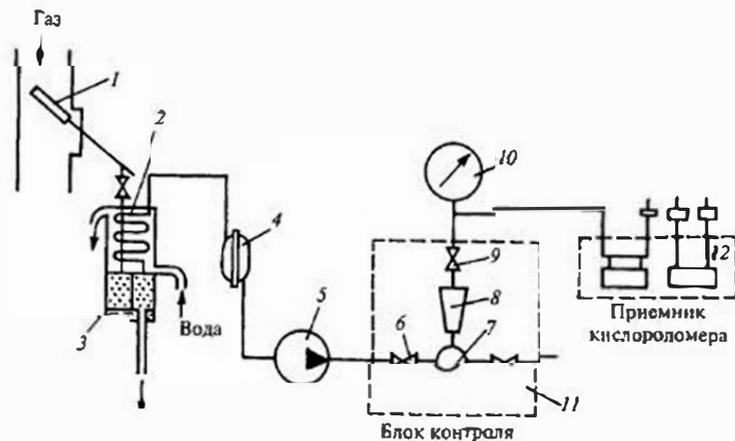


Рис. 16.17. Схема установки приемника кислородомера:

1 — керамический фильтр; 2 — холодильник; 3 — конденсат; 4 — фильтр тонкой очистки; 5 — электронасос; 6, 9 — вентиль; 7 — контрольный фильтр; 8 — ротаметр; 10 — напоромер; 11 — блок контроля; 12 — кислородомер

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, обеспечивающим также снижение влажности анализируемого газа. Конструкция холодильника зависит от температуры и состава газа. При температуре газов 400...600 °С 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. 16.17, применяется комбинированный охладитель, нижняя его часть, заполненная железными стружками, служит для сбора конденсата и удаления сернистого газа.

Установки газоанализаторов обычно содержат несколько фильтров, предназначенных для очистки газа от механических частиц, капелек влаги и неопределяемых компонентов. Таким образом, установка, представленная на рис. 16.17, помимо керамического фильтра 1 для удаления мелких механических частиц включает в себя тканевый фильтр тонкой очистки 4 и контрольный 7.

Для осушки газа служат фильтры, заполненные гранулами хлористого кальция, или силикагеля. Удаление неопределяемых компонентов производится химическими фильтрами или с помощью печей дожига. Для поглощения сероводорода фильтр заполняется болотной рудой, диоксид углерода удаляется поглотителем ХПИ, а хлор — активированным углем. Водород сжигается в электрических печах дожига.

На рис. 16.17 элементы 5—9 объединены в блок контроля 11 и предназначены для прососа газа через установку, контроля и поддержания постоянства его расхода и давления. Ротаметром 8 измеряется расход газа, регулируемый вентилем 9. Требуемое давление в линии устанавливается вентилем 6 и контролируется напоромером 10, побудителем расхода служит электронасос 5.

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 кон-

центрации установились в пределах основной погрешности, необходима в среднем двух — пятикратная смена внутреннего объема в установке от точки отбора давления до приемника кислородомера 12. В связи с этим последние вместе с вспомогательными устройствами размещают вблизи технологических объектов. Чтобы уменьшить запаздывание показаний, повышают скорости анализируемого газа в линиях за счет байпасирования приемника газоанализатора. Сокращение длины газовых линий и уменьшение запаздывания может быть получено также за счет отбора газа из нетель, шунтирующих участки технологических объектов.

Проверка показаний газоанализаторов производится с помощью образцовых газовых смесей, заключенных в баллоны и прилагаемых к газоанализаторам.

### Контрольные вопросы

1. Чем вызывается строгая последовательность определения компонентов газовой смеси в химических газоанализаторах?
2. Почему объемные химические анализаторы не используются для измерения малых концентраций определяемого компонента?
3. Чем вызвана необходимость удаления водорода в газоанализаторах по теплопроводности при измерении концентрации  $\text{CO}_2$ ?
4. Почему в измерительных схемах аналоговых тепловых и магнитных газоанализаторов применяют двухмостовые соединения, которые отсутствуют в аналогичных микропроцессорных приборах?
5. Что такое термомагнитная конвекция?
6. Какие параметры окружающей среды влияют на показания магнитного газоанализатора и почему?
7. Каково назначение фильтровых камер в оптическом газоанализаторе на  $\text{CO}_2$ ?
8. Каков принцип действия амперометрических газоанализаторов?
9. Какие характеристики газовой смеси определяются по времени удерживания и высоте пика хроматограммы?
10. Какие газы-носители используются в хроматографах?
11. Какие детекторы применяются в газовых хроматографах?
12. Какие элементы включают установки промышленных газоанализаторов по теплопроводности и термомагнитных?

## 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, 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 электрохимического, оптического и теплового методов, приведенные в табл. 17.1 [30, 32, 37, 38].

В табл. 17.1 не приведены такие методы, как хроматографический, титриметрический, масс-спектрометрический. Первый более широко применяется для анализа состава газа (см. гл. 16). Титриметрический 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, амперометрический и кулонометрический, применяемые для измерения микроконцентраций растворенных веществ. Последние два метода были рассмотрены в § 16.6. Подобно газоанализаторам приборы для анализа жидкостей представляют собой установки, содержащие помимо первичных и измерительных преобразователей вспомогательные устройства для подготовки пробы и ее транспортирования.

В РФ и странах СНГ анализаторы жидкостей выпускаются такими организациями как «Техноприбор», «Аналитические приборы и системы», «Эконикс», «Измерительная техника» (г. Москва), «Кварц» (С.-Петербург), «Автоматика» (г. Владимир), «Уралсемикондактор» (г. Екатеринбург), «Измеритель» (г. Гомель), «Аналит-

Таблица 17.1

## Методы анализа растворов

Метод	Измеряемая величина
<b>Электрохимический</b>	
Кондуктометрический	Общая электрическая проводимость, концентрация диссоциирующего вещества в растворе, кондуктометрическое титрование
Потенциометрический	Концентрация конкретных ионов (ионометрия), окислительно-восстановительный потенциал (редоксометрия), потенциометрическое титрование
Амперометрический Кулонометрический	Концентрация определенного вещества в растворе или расплаве
<b>Оптический</b>	
Колориметрический Пламенно-фотометрический	Концентрация определенного вещества в растворе или расплаве
Турбидиметрический Нсфелометрический	Концентрация взвешенных частиц в суспензиях и эмульсиях
<b>Тепловой</b>	
Термокондуктометрический	Измерение концентрации растворенных газов

прибор» (г. Тбилиси), «Дила» (г. Гори) и др. В РФ получили распространение анализаторы таких фирм как Siemens, Jumo, Honeywell, Foxboro, Yokogawa, Swan и др.

## 17.2. Кондуктометрический\* метод анализа растворов

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 соледержания (мг/кг NaCl) или концентрации (% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

\* От слова conduct (англ.) — проводить.

Удельная электропроводность раствора  $\kappa$ , См/см, являющаяся величиной, обратной удельному сопротивлению, связана с эквивалентной концентрацией  $\eta$  (н-экв/см<sup>3</sup>) следующей зависимостью [31, 37]:

$$\kappa = \sigma \lambda \eta, \quad (17.1)$$

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 слабых. 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, т.е.  $\lambda = \lambda_A + \lambda_K$ .

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 из-за уменьшения степени диссоциации молекул. Учитывая неоднозначный характер зависимости электропроводности от концентрации, необходимо заранее знать область работы кондуктометра, исключая возможность измерений в области экстремума.

Удельная электропроводность раствора зависит не только от концентрации вещества и его при-

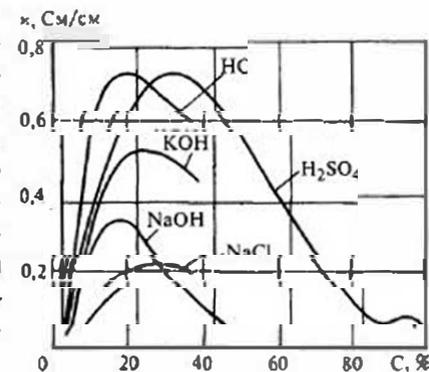


Рис. 17.1. Графики зависимости удельной электропроводности от концентрации при 18 °С

роды, 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 °С квадратичный член в уравнении (17.2) может быть опущен. В табл. 17.2 приведены значения подвижностей ионов при температуре 25 °С 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 растворов в 2—8 раз выше, чем подвижность остальных ионов. Этим объясняется высокая электропроводность растворов кислот и щелочей. Приведенные 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

$$\kappa = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i \eta_i. \quad (17.3)$$

Таблица 17.2

Значения подвижностей ионов и температурных коэффициентов

Катионы	$\lambda_{\infty}$ , См · см <sup>2</sup> /г · экв	$\alpha \cdot 10$ , 1/°С	Анионы	$\lambda_{\infty}$ , См · см <sup>2</sup> /г · экв	$\alpha \cdot 10$ , 1/°С
H <sup>+</sup>	349,8	0,142	OH <sup>-</sup>	198,3	0,196
Na <sup>+</sup>	50,10	0,208	Cl <sup>-</sup>	76,35	0,193
K <sup>+</sup>	73,50	0,187	F <sup>-</sup>	55,40	0,210
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	73,55	0,187	Br <sup>-</sup>	78,14	0,185
Li <sup>+</sup>	38,60	0,214	I <sup>-</sup>	76,85	0,190
Ag <sup>+</sup>	61,90	0,194	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	44,50	0,202
1/2Ca <sup>2+</sup>	59,50	0,210	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	71,40	0,248
1/2Mg <sup>2+</sup>	53,05	0,218	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71,40	0,184
1/2Fe <sup>2+</sup>	53,50	0,240	1/2CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	69,30	0,192
1/2Zn <sup>2+</sup>	54,00	0,185	1/2NO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80,02	0,206

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 солесодержания, обычно в процентах содержания NaCl. Концентратомеры градуируются в процентах содержания анализируемого вещества.

Теоретически чистая вода при температуре 25 °С обладает электропроводностью, составляющей 0,055 мкСм/см. При измерении малых концентраций растворенных веществ электропроводность воды создает фоновую составляющую, нарушающую пропорциональную зависимость между электропроводностью и концентрацией ионов.

На тепловых и атомных электростанциях конденсат перегретого и насыщенного пара, питательная и химически обессоленная вода, обладая малым солесодержанием, 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 за счет 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 безэлектродные методы, последние 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  $R$  между которыми связано с удельной электропроводностью следующей зависимостью:

$$R_x = l/(\kappa S) = k/\kappa, \quad (17.4)$$

где  $l$ ,  $S$  — расстояние между электродами и их площадь.

Коэффициент  $k$ , имеющий размерность  $\text{см}^{-1}$ , называют постоянной первичного преобразователя (датчика).

Известная постоянная первичного преобразователя позволяет легко осуществить переход от измеряемого обычными методами сопротивления  $R_x$  к удельной электропроводности раствора. Постоянная преобразователя определяется с помощью градуировки по контрольным растворам с известной электропроводностью.

Измерительные схемы, используемые для определения сопротивления первичного преобразователя электропроводности, питаются переменным током. При использовании постоянного тока происходит поляризация электродов. Около их поверхности собираются ионы противоположного знака и продукты электролиза (пузырьки газов), вызывая образование внутренней противоЭДС 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 измерениях 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, включающие 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 посредством введения комплексного сопротивления в одно из прилежащих к плечу  $R_x$  плеч моста, используемого для измерения сопротивления раствора. Электрод-

ные преобразователи для измерения электропроводности в промышленных условиях разделяются на магистральные, погружные и проточные. Магистральные преобразователи 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.

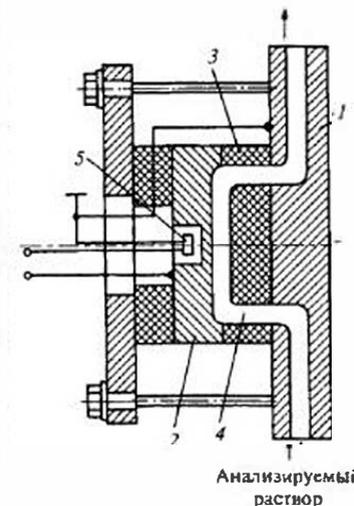


Схема проточного электродного преобразователя микропроцессорного кондуктометра КАЦ-037 (ф. «Техноприбор») представлена на рис. 17.2. Выполненный из нержавеющей стали корпус 1 служит одним электродом, второй электрод 2 отделен от первого изолирующей прокладкой 3. Постоянная электродного преобразователя меняется за счет изменения высоты прокладки 3 и сечения каналов 4, подводящих анализируемый раствор. Внутри электрода 2 находится кремниевый терморезистор 5, один из его выводов и электрод 1 заземлены.

Схема электродного преобразователя переносного кондуктометра КПЦ-026, выпускаемого тем же НПП, представлена на рис. 17.3. В корпусе из оргстекла 1 находятся три электрода. Ячейку с постоянной 0,004 1/см образуют электроды 2, 3 (выводы I, II), она предназначена для измерения глубоко обессоленных растворов. Электроды 2, 4 (выводы II, III) образуют ячейку с постоянной 4 1/см, используемую для измерения электропроводности концентрированных растворов. Для введения температурной компенсации применяется кремниевый терморезистор 5. Этот преобразователь может использоваться как в проточном, так и в погружном вариантах. Нанесенная на корпусе преобразователя линия 0 соответствует глубине погружения преобразователя в раствор при измерении электропроводности электродами 2, 4. В этом случае в раствор погружается верхняя часть преобразователя, что защищает электроды 2, 3 от засоления.

Рис. 17.2. Схема проточного электродного преобразователя кондуктометра:

1 — корпус; 2 — электрод; 3 — прокладка; 4 — канал; 5 — терморезистор

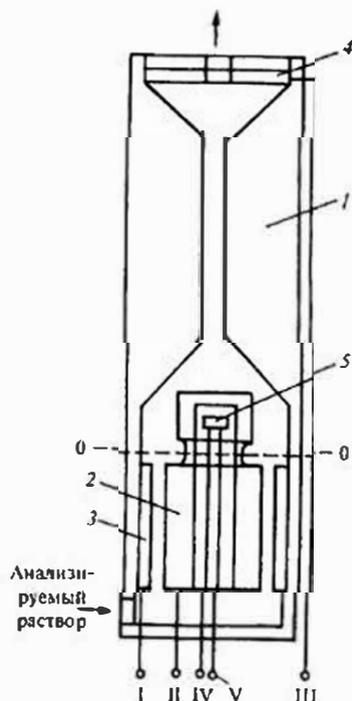


Рис. 17.3. Схема электродного преобразователя переносного кондуктометра:

1 — корпус из оргстекла; 2—4 — электроды; 5 — терморезистор

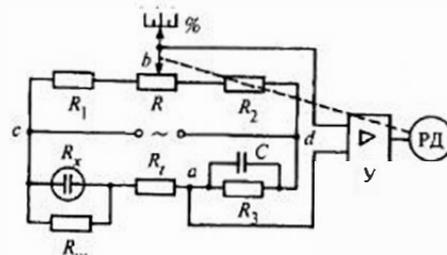


Рис. 17.4. Измерительная схема кондуктометра

Лабораторный переносной кондуктометр «ЭКА-2» (ф. «Эко-никс») имеет близкие к рассмотренному электродные преобразователи, обеспечивающие измерение электропроводности от 0,05 мкСм/см до 20 мСм/см.

Для снижения влияния поляризации выпускаются преобразователи с четырьмя электродами, к двум из которых подводится напряжение, а между двумя другими измеряется сопротивление раствора. К числу таких электродных преобразователей относятся мод. 4973 ф. Honeywell, SC402 ф. Yokogawa.

Первичные преобразователи кондуктометров могут подключаться к различным измерительным схемам. К числу наиболее распространенных относится схема уравновешенного моста, представленная на рис. 17.4. Она 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 проволоочный резистор  $R_t$  и шунтирующий  $R_x$  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 двигателя РД, соединенного с движком реохорда и показывающей стрелкой прибора.

В рассматриваемой измерительной схеме компенсация влияния температуры раствора на электропроводность осуществляется с помощью медного резистора  $R_t$ , размещенного внутри первичного преобразователя и имеющего температуру раствора. Поскольку сопротивление раствора  $R_x$  имеет отрицательный температурный коэффициент, а медный резистор — положительный, включение последнего в плечо противоположное или одно с первичным преобразователем позволяет снизить влияние температуры.

Для осуществления температурной компенсации могут быть также использованы полупроводниковые терморезисторы и жидкостные преобразователи сравнения. Последние имеют ту же конструкцию, что и рабочие электродные преобразователи, но их герметизированный корпус заполнен раствором с постоянной концентрацией. Преобразователи сравнения погружаются в анализируемый раствор и имеют его температуру. Поскольку сопротивления полупроводниковых резисторов и жидкостных преобразователей сравнения, как и рабочих, имеют отрицательный температурный коэффициент, они включаются в одно из прилежащих к измерительному плечу моста. С рассмотренными автоматическими мостами работают индикаторы соледержания РЭС с диапазоном измерения 0...4 мг/кг и солемеры котловой воды САР, СКМ, имеющие диапазоны измерения условного соледержания до 10 000 мг/л.

Кондуктометр КАЦ-037 содержит, представленный на рис. 17.2, электродный преобразователь и микропроцессорный измерительный преобразователь, структурная схема которого дана на рис. 17.5. Микропроцессор (МП) управляет работой коммутаторов  $K_1$ ,  $K_2$ . Первый подает импульсы тока, сформированные цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) и формирователем тока (ФТ) на электродный преобразователь, терморезистор  $R_t$ , контрольную цепь и образцовое сопротивление 10 кОм. Коммутатор  $K_2$  подает падение напряжения на перечисленных элементах на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Рассчитанное значение электропроводности для температуры 25 °С поступает из ОЗУ как на дешифратор (Д) с цифровым индикатором (ЦИ), так и на ЦАП формирователя тока, создающего выходной унифицированный сигнал 4...20 или 0...5 мА. Диапазон измеряемых электропроводностей составляет от 0...0,2 до 0...20 000 мкСм/см при пределе приведенной погрешности

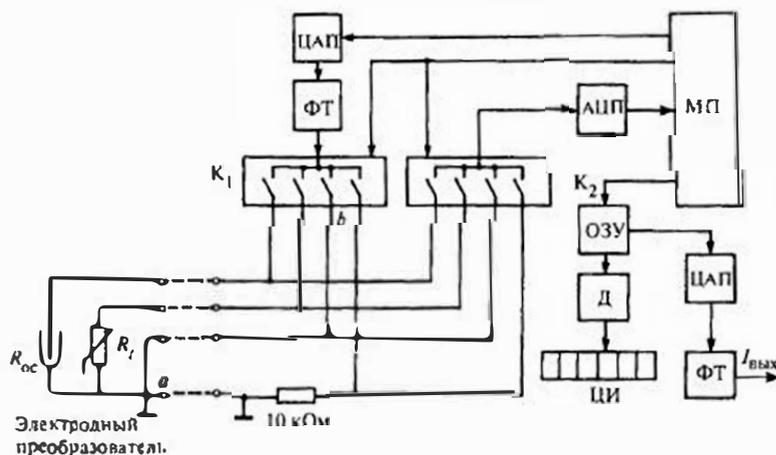


Рис. 17.5. Структурная схема измерительного преобразователя микропроцессорного кондуктометра КАЦ-037

$\pm 1,5\%$ . Широкий диапазон измерения приборов осуществляется за счет использования трех электродных преобразователей ДК-1, ДК-2, ДК-3. При измерении электропроводности конденсата для снижения влияния растворенных газов используются предвключенные Н-катионитовые фильтры. В переносном кондуктометре предусмотрена возможность установки Н-катионитового фильтра рядом с электродным преобразователем, схема которого дана на рис. 17.3.

В аналоговых кондуктометрах НПП «Техноприбор» компенсация влияния температуры на электропроводность раствора производится в результате изменения тока питания электродного преобразователя. Постоянство падения напряжения на электродном преобразователе при постоянной концентрации раствора обеспечивается за счет увеличения тока питания преобразователя при увеличении температуры раствора. Сигнализатор истощения фильтров СИФ-031 предназначен для контроля истощения, регенерации и отмывки Н-катионитовых фильтров химводоочистки. Сигнализатор включает два электродных преобразователя, устанавливаемых на входе и выходе фильтра и измерительный блок. Диапазон измерения электропроводности составляет  $0 \dots 1000$  и  $0 \dots 10000$  мкСм/см, срабатывание сигнализации может быть установлено в диапазоне от 10 до 300 мкСм/см.

К числу распространенных анализаторов жидкости относятся кондуктометры серии АЖК-3101, КК, содержащие как электродные преобразователи, так и безэлектродные. Приборами этой серии можно

производить измерения электропроводности от  $10^{-6}$  до 1 См/см при диапазоне температур рабочей жидкости  $10 \dots 60$  °С с предельной основной погрешностью  $\pm 2\%$ .

Наиболее существенными недостатками электродных кондуктометров являются поляризация и загрязнение электродов продуктами электрохимических реакций, протекающих на их поверхности, а также веществами, находящимися в растворах. Последнее вызывает необходимость их периодической механической или химической очистки и отмывки.

#### 17.4. Безэлектродные кондуктометры

Безэлектродные преобразователи содержат первичные преобразователи, не имеющие непосредственного контакта с измеряемой средой и свободные от таких недостатков, как поляризация электродов и их загрязнение. Различают две разновидности безэлектродных кондуктометров: высокочастотные и низкочастотные.

В первых, работающих на частотах более 1 кГц, измерение концентрации анализируемого раствора производится с помощью 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  $C$  и  $L$  существует сложная зависимость, на которую влияют помимо природы раствора геометрия и материал преобразователя, частота питания и другие, их градуировочные характеристики определяются экспериментально для конкретного преобразователя и раствора.

В качестве измерительных преобразователей высокочастотных кондуктометров используются мостовые и резонансные схемы, питаемые от генераторов высокой частоты. В последних схемах измеряется частота собственных колебаний резонансного контура, зависящая от индуктивного или емкостного сопротивления первичного преобразователя.

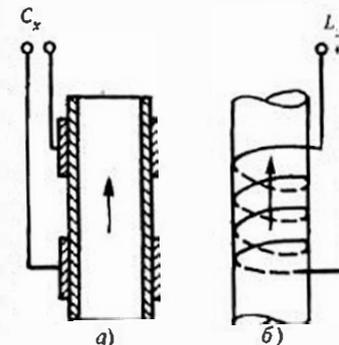


Рис. 17.6. Первичные преобразователи безэлектродных кондуктометров:  
а — емкостные; б — индуктивные

В низкочастотных безэлектродных кондуктометрах анализируемый раствор электролита образует виток проводника, который является вторичной обмоткой трансформатора возбуждения и первичной обмоткой измерительного трансформатора. Сопротивление жидкостного витка определяется геометрией преобразователя и электропроводностью жидкости. Ток во вторичной обмотке измерительного трансформатора пропорционален напряжению возбуждения и проводимости контролируемого раствора.

Принципиальная схема безэлектродного преобразователя концентратомера КАЦ-021, выпускаемого НПП «Техноприбор», приведена на рис. 17.7, а. Преобразователь погружается в анализируемый раствор и крепится на стенке резервуара с помощью фланца 1. Глубина погружения преобразователя может составлять от 150 до 1500 мм. На конце несущей трубы 2 находится контейнер 3, внутри его размещены два тороидальных трансформатора 4 с ферритовыми сердечниками 5 и терморезистор 6.

Компенсация влияния температуры на проводимость раствора осуществляется пропорциональным изменением напряжения, подаваемого от блока питания БП на обмотку возбуждения. Сигнал с измерительной обмотки поступает на усилитель У, рис. 17.7, б, к выходу которого подключены АЦП, ЦАП, устройство формирования унифицированного токового сигнала ФТ и цифровой 4-разряд-

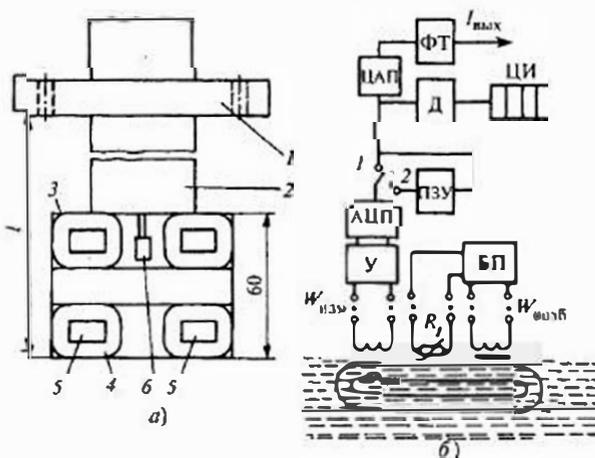


Рис. 17.7. Схема безэлектродного преобразователя концентратомера КАЦ-021: а — схема первичного преобразователя; б — структура измерительного преобразователя; 1 — фланец; 2 — труба; 3 — контейнер; 4 — тороидальные трансформаторы; 5 — ферритовые сердечники; 6 — терморезистор

ный индикатор ЦИ с дешифратором Д. В положении переключателя 1 преобразователь работает в режиме индикации электропроводности как кондуктометр, а в положении переключателя 2 — как концентратомер. Для этого в ПЗУ вводится код концентрации, соответствующий сигналу проводимости. Кондуктометр КАЦ-021 работает в диапазоне электропроводностей от 0...5 до 5...1000 мСм/см, предел приведенной погрешности составляет  $\pm 1,5\%$ . При работе прибора в режиме концентратомера, отградуированного в % NaCl, NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, погрешность составляет  $\pm 3\%$ .

В кондуктометрах серии АЖК-3101, АКК-М и КК измерение электропроводности от  $10^{-2}$  до 1 См/см производится безэлектродными преобразователями погружного и проточного типов.

Широкий диапазон измерения электрической проводимости за счет использования электродных и безэлектродных преобразователей имеют кондуктометры серии SIPAN32 (ф. Siemens), серии 873, 875, 870IT (ф. Foxboro), APT2000CC, APT4000CC (ф. Honeywell), SC150, SC202, (ф. Yokogawa), dTRANS Lf 01, CTI-920 (ф. Jumo) и др.

**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 образцовым 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.

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
$10^{-6} - 10^{-1}$	Хлористого калия в этиленгликоле	13—18	0,075—0,149

### 17.5. Потенциометрический метод анализа

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 концентрациях 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 [31, 37, 39]:

$$E = E_0 + RT(\ln a)/(nF), \quad (17.5)$$

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 потенциалобразующих 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

Таблица 17.4

Нормальные электродные потенциалы, определенные по водородной шкале

Электрод	Потенциал, В	Электрод	Потенциал, В
Li <sup>+</sup> /Li	-3,045	Cu <sup>2+</sup> /Cu	+0,337
K <sup>+</sup> /K	-2,925	Ag <sup>+</sup> /Ag	+0,799
Ca <sup>2+</sup> /Ca	-2,866	Hg <sup>2+</sup> /Hg	+0,845
Na <sup>+</sup> /Na	-2,714	Pt <sup>2+</sup> /Pt	+0,910
Al <sup>3+</sup> /Al	-1,662	Cl <sup>-</sup> /Cl <sub>2</sub> , Pt	+1,3595
Fe <sup>2+</sup> /Fe	-0,4402	Au <sup>3+</sup> /Au	+1,498

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 перед водородом. В графе «электрод» указаны потенциалобразующие 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 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup> и др. Этот метод используется также для измерения окислительно-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:

$$E = E_0 + 0,058[\lg a_{Ox}/a_{Rd}]/n, \quad (17.6)$$

где  $a_{Ox}$ ,  $a_{Rd}$  — активности окисленной и восстановленной форм ионов;  $n$  — число электронов, участвующих в реакции;  $E_0$  — нормальный окислительно-восстановительный потенциал системы при  $a_{Ox}/a_{Rd} = 1$ .

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, 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. Если температура чистой воды повышается до  $100^\circ C$ , то она приобретает кислые свойства, при этом число pH снижается до 6,12. Вода с нулевой температурой обладает щелочными свойствами и  $pH = 7,97$ . Для водных растворов диапазон изменения pH составляет 0...14, для аммиачных  $pH = 0...32,7$ , а для муравьиной кислоты  $pH = 0...6,13$ .

### 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 металлы, либо металлы с сорбированным на поверхности газом, например, как водородный электрод. Электроды второго типа являются системами, включающими в себя металлический контактный электрод, его плохо растворимую соль и раствор, содержащий анионы этой соли, определяющие потенциал электрода, например  $Ag/AgCl/HCl$ . К третьему типу относятся электроды специального назначения, такие, например, как электроды с жидкостными мембранами. Электроды из чистых металлов в растворах быстро покрываются слоем окисной пленки и других хими-

ческих 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 под давлением водород. При образовании первичного преобразователя (электродной системы, сенсора), из двух водородных электродов, из которых вспомогательный является нормальным, при температуре  $20^\circ C$  развивается  $E = 0,058pH$ , В. На границе

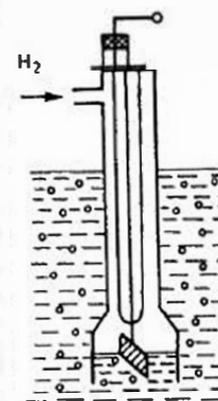


Рис. 17.8. Схема водородного электрода

раздела анализируемого раствора и раствора нормального электрода возникает диффузионный потенциал, вызывающий ошибку в измерении pH, достигающую 0,05 pH. Необходимость подачи в электрод водорода, отравление платины рядом химических веществ, присутствующими в растворах, обусловили их использование только в качестве образцовых, применяемых в лабораторной практике.

Для измерения числа pH 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

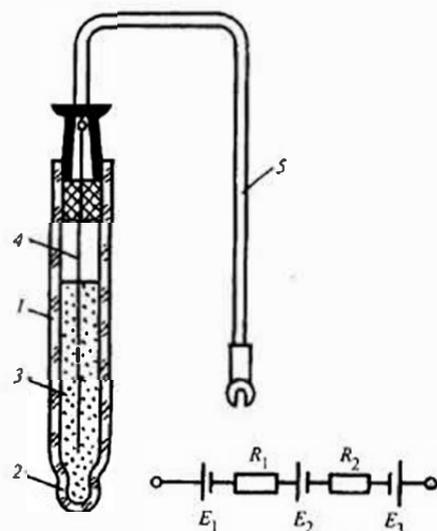


Рис. 17.9. Схема рабочего стеклянного электрода:

1 — калибровочная трубка; 2 — мембрана из литиевого стекла; 3 — постоянная концентрация раствора; 4 — контактный электрод; 5 — выводной проводник

На внутренней поверхности чувствительной мембраны 2 развивается потенциал  $E_2$ , который при постоянной концентрации раствора 3, так же как и  $E_1$ , зависит только от температуры. Чувствительная мембрана обладает асимметрией, которая проявляется в виде разности потенциалов на внешней и внутренней поверхностях при одинаковых активных концентрациях ионов водорода в растворах внутри и вне электрода.

Эквивалентная электрическая схема помимо рассмотренных  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  включает активные сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Сопротивление  $R_1$  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 сопротивление 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

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 проводником 5. Для обеспечения постоянства потенциала  $E_1$ , возникающего на поверхности контактного электрода 4, используется второй тип электрода, включающего металл Ag, его плохо растворимую соль AgCl и раствор, содержащий анионы соли HCl. Поскольку концентрация раствора внутри стеклянного электрода постоянна, потенциал  $E_1$ , согласно (17.5) зависит только от температуры раствора.

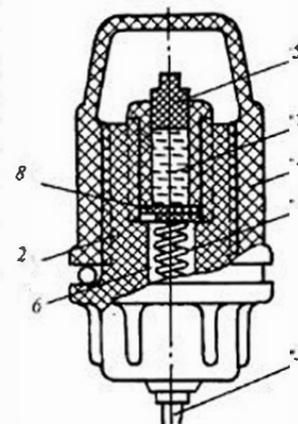
электродах в качестве контактного используется серебряный электрод, покрытый слоем плохо растворимой соли хлористого или бромистого серебра AgCl, AgBr, при этом электроды заполнены соответственно растворами HCl или HBr. Внутри рабочего стеклянного каломельного электрода находятся ртуть, ее плохо растворимая соль  $Hg_2Cl_2$  (каломель) и раствор KCl. Контактный электрод вводится внутрь ртути. Использование в каломельном электроде токсичной ртути ограничивает область его применения.

Крутизна водородной характеристики промышленных стеклянных электродов определяется уравнением (ГОСТ 16287-77)  $S_j = -(54,197 + 0,1984t)$ , мВ/(рН °С). При температуре 20 °С чувствительность составляет 58 мВ/рН, температурный коэффициент равен примерно 0,2 мВ/(рН °С). Промышленные стеклянные электроды выпускаются в нескольких модификациях, отличающихся диапазоном измерения рН, областью температур и давлений анализируемой среды, верхние их значения составляют по температуре 150 °С, по давлению 1,2 МПа. Для того, чтобы стеклянный электрод полностью приобрел водородные функции, его перед включением вымачивают в дистиллированной воде.

Для замыкания электрической цепи в раствор помимо рабочего электрода вводится вспомогательный электрод (сравнения). В качестве вспомогательных электродов используют электроды второго типа — хлорсеребряные, реже — каломельные. Для исключения влияния температуры анализируемого раствора на ЭДС вспомогательных электродов последние часто делают выносными с замыканием электрической цепи через электролитический ключ. Схема хлорсеребряного выносного вспомогательного электрода представлена на рис. 17.10. 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 KCl.

Рис. 17.10. Схема выносного вспомогательного электрода:

1 — серебряный электрод; 2 — пластмассовый корпус; 3 — электрический вывод; 4 — крышка; 5 — пробка; 6 — кристаллы хлористого серебра; 7 — насыщенный раствор KCl; 8 — пористая перегородка



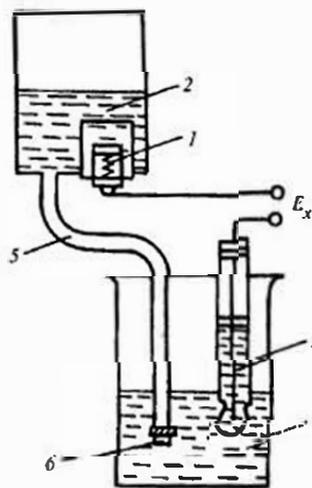


Рис. 17.11. Схема электродной системы pH-метра с выносным вспомогательным электродом:  
1 — вспомогательный электрод; 2 — резервуар; 3 — стеклянный электрод; 4 — анализируемый раствор; 5 — резиновая трубка; 6 — винт с микропористой прокладкой

В электродной системе, представленной на рис. 17.11, вспомогательный электрод 1 находится в резервуаре 2, заполненном насыщенным раствором KCl. Электрическая цепь между стеклянным электродом 3, погруженным в анализируемый раствор 4, и вспомогательным электродом 1 замыкается через раствор KCl, стекающий по резиновой трубке 5 в анализируемый раствор. На конце трубки 5 находится винт 6 с микропористой прокладкой, с помощью которых устанавливается медленный сток раствора, достигающий 15...30 мл/сут.

Трубка 5 с протоком раствора электролита называется «соляным мостиком» или «электролитическим ключом». Вытекание раствора KCl 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 выносных электродов могут работать при давлении анализируемой среды до 0,6 МПа.

Эквивалентная электрическая схема электродной системы кроме рассмотренных  $E_1—E_3$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  содержит ЭДС вспомогательного электрода, диффузионную разность потенциалов, суммарное сопротивление вспомогательного электрода и анализируемого раствора. Сопротивление вспомогательного электрода с электролитическим ключом составляет 2...5 кОм. Вспомогательные электроды могут выполняться недроточными.

Серебряный электрод 1 окружен кристаллами хлористого серебра 6, которые для предотвращения диффузии отделены от насыщенного раствора KCl 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, представленной на рис. 17.11, вспомогательный электрод 1 находится в резервуаре 2, заполненном насыщенным раствором KCl. Электрическая цепь между стеклянным электродом 3, погруженным в анализируемый раствор 4, и вспомогательным электродом 1 замыкается через раствор KCl, стекающий по резиновой трубке 5 в анализируемый раствор. На конце трубки 5 находится винт 6 с микропористой прокладкой, с помощью которых устанавливается медленный сток раствора, достигающий 15...30 мл/сут.

Для лабораторных измерений выпускаются вспомогательные электроды различных конструкций, схема одной из которых представлена на рис. 17.12, а. Корпус 1 электрода выполнен из стекла, в насыщенный раствор KCl опущена стеклянная трубка 2, закрытая снизу асбестовой проницаемой пробкой. Внутри трубки 2 находится контактный серебряный электрод 3, окруженный раствором KCl и кристаллами хлористого серебра. Электрическая связь контактного электрода с анализируемым раствором осуществляется с помощью электролитического ключа, роль которого играет пропитанный раствором шнур 4. Через отверстие 5 в корпусе электрода может доливаться раствор KCl.

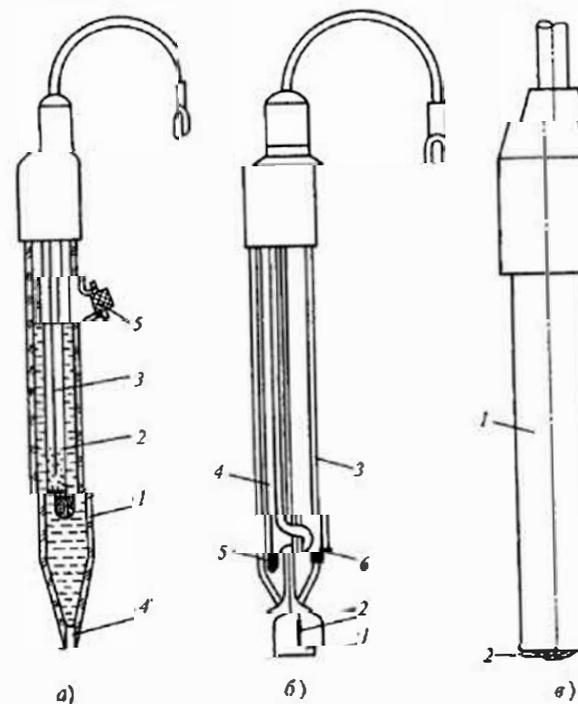


Рис. 17.12. Схемы электродов pH-метров:

а — вспомогательный стеклянный электрод: 1 — корпус; 2 — стеклянная трубка; 3 — серебряный электрод; 4 — шнур; 5 — отверстие; 6 — стеклянный комбинированный электрод типа ЭСК-1: 1 — чувствительная мембрана; 2 — контактный серебряный электрод; 3 — корпус; 4 — хлорсеребряный электрод сравнения; 5, 6 — проницаемые пробки; в — ионоселективный рабочий электрод: 1 — пластмассовый корпус; 2 — чувствительная мембрана

В настоящее время выпускаются разнообразные конструкции электродов. Рабочие и вспомогательные электроды могут выполняться в пластмассовом корпусе. В комбинированных электродах рабочий и вспомогательный электроды объединены в одном корпусе, который может быть стеклянным или пластмассовым. Использование комбинированных электродов упрощает выполнение экспрессного и лабораторного анализа. К числу перечисленных относятся электроды, предназначенные для измерения pH и окислительно-восстановительного потенциала серии 871 (ф. Foxboro), мод. 7777/7794 (ф. Honeywell), 2G, 2M (ф. Jumo) и др. На рис. 17.12, б представлена схема стеклянного комбинированного электрода типа ЭСК-1. Чувствительная мембрана 1 контактирует с анализируемым раствором. Внутри ее в растворе HCl с кристаллами AgCl находится контактный серебряный электрод 2. Внутри толстостенного корпуса 3 находится раствор KCl и хлорсеребряный электрод сравнения 4. Последний с раствором KCl сообщается через пронцаемую пробку 5. Цепь электродов рабочего и сравнения замыкается через пронцаемую пробку 6. Электрическое сопротивление такого комбинированного электрода находится в пределах 10...450 МОм.

Для измерения таких ионов как  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$  используются ионоселективные электроды. В портативном микропроцессорном pH-метре-иономере «Экотест-120» число контролируемых ионов достигает 27. Схема ионоселективного рабочего электрода представлена на рис. 17.12, в. Чувствительная мембрана 2 находится в нижней части пластмассового корпуса 1. В зависимости от анализируемых ионов она может быть керамической, моно- или поликристаллической. Эти электроды работают в паре с хлорсеребряными электродами сравнения.

Общий вид градуировочной характеристики электродной системы pH-метра представлен на рис. 17.13. Результирующая ЭДС, развиваемая электродной системой, зависит от числа pH раствора и его температуры. В точке И от температуры ЭДС не зависит, 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. Уравнение, описывающее рассмотренные характеристики,

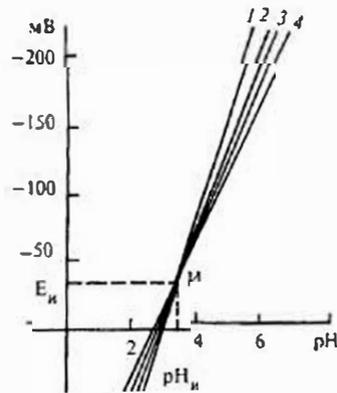


Рис. 17.13. Градуировочная характеристика электродной системы:  
1—4 —  $t^{\circ} = 100^{\circ}C; 60; 20; 0$

имеет вид  $E = E_{и} + [S_{20} + \alpha(t - 20)](pH - pH_{и})$ , где  $S_{20}$ ,  $\alpha$  — крутизна характеристики электродной системы при температуре  $20^{\circ}C$  и ее температурный коэффициент.

Выпускаемые отечественной промышленностью рабочие стеклянные и вспомогательные электроды стандартизованы. Для одной из промышленных электродных систем, включающей стеклянный рабочий электрод и выносной вспомогательный насыщенный хлорсеребряный электрод, градуировочная характеристика определяется выражением  $E = -33 - (54,197 + 0,1984t_p)(pH - 3,28)$ . 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 электродных систем должен производиться исходя из диапазона измеряемых значений pH.

В промышленных pH-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 pH-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 pH-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 KCl стекает из бачка 4. В последнем находится вспомогательный выносной электрод. В анализируемый раствор погружен также медный термопреобразователь сопротивления 5.

Для подключения электродной системы к измерительному преобразователю 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.

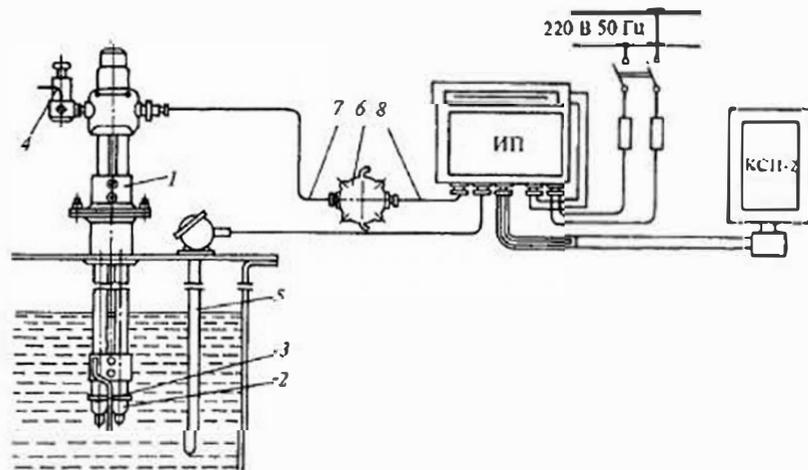


Рис. 17.14. Схема установки рН-метра с погружным электродным преобразователем:

1 — преобразователь; 2 — электрод; 3 — фторопластовая трубка; 4 — бачок; 5 — медный термпреобразователь сопротивления; 6 — распределительная коробка; 7 — кабель электродов; 8 — высокоточный радиотехнический кабель

## 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 сопротивление не менее  $10^{12}$  Ом.

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, допускать коррекцию параметров изопотенциальной точки  $pH_{и}$ ,  $E_{и}$  и крутизны градуировочной характеристики. В изопотенциальной точке температурная компенсация должна отсутствовать. Общие приемы решения этих задач рассмотрим на примере схемы измерительного блока

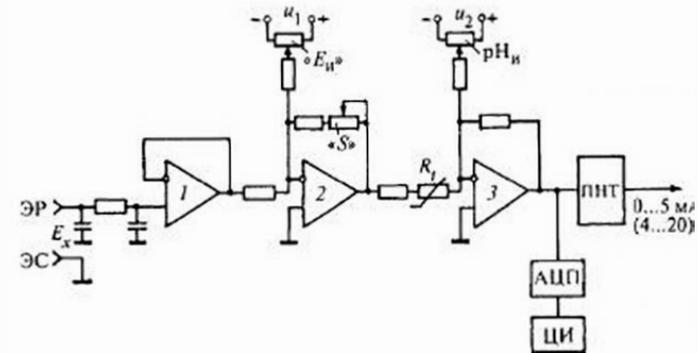


Рис. 17.15. Упрощенная схема аналогового преобразователя рН-метра

аналогового преобразователя рН-011 (НПП «Техноприбор»), представленной на рис. 17.15.

Сигнал от электродной системы  $E_x$  подается на вход повторителя 1, имеющего высокоомный вход. За счет изменения коэффициента усиления микросхемы 2 корректируются отклонения крутизны электродной системы «S» от номинального значения. В этом же каскаде сигналом от источника  $u_1$  компенсируется координата изопотенциальной точки « $E_{и}$ ». В следующем каскаде вводятся компенсации как влияния температуры с помощью медного резистора  $R_t$ , находящегося в анализируемом растворе, так и координаты изопотенциальной точки « $pH_{и}$ ». За счет этих сигналов исключается введение сигнала температурной компенсации в изопотенциальной точке. Признаком правильной настройки измерительного блока является отсутствие изменений выходного сигнала при изменении сопротивления  $R_t$  в точке  $pH = pH_{и}$  ( $E_x = E_{и}$ ).

Выходной сигнал после каскада 3 поступает на аналого-цифровой преобразователь АЦП с цифровым 4-разрядным индикатором ЦИ и на преобразователь напряжения в ток ПНТ, обеспечивающего получение унифицированных токовых сигналов 0...5 и 4...20 мА. ПНТ имеет несколько каскадов, включающих гальваническое разделение, переключатели изменения диапазонов измерения, резисторы плавной регулировки. Прибор имеет при переменном нижнем пределе измерения диапазоны от 1 до 15 рН и  $-2000...2000$  мВ. Погрешность измерительного блока составляет  $\pm 0,05$  рН и  $\pm 2$  мВ.

В микропроцессорных рН-метрах упрощается процесс настройки, поскольку градуировочные характеристики конкретной электродной

системы вводятся в постоянную память микропроцессора. Используя сигналы электродной системы и термопреобразователя микропроцессор рассчитывает значение рН.

К числу наиболее распространенных в стране рН-метров относятся рН-201 и рН-261. Их измерительные преобразователи имеют выходные сигналы по постоянному напряжению 0...50 мВ и токочный 0...5 мА. Это обеспечивает возможность их работы в комплекте с автоматическими потенциометрами, устройствами регулирования и контроля, использующими унифицированный токочный сигнал. Прибор рН-201 имеет пять диапазонов измерения числа рН: 1; 2,5; 5; 10; 15, предельная допустимая погрешность составляет  $\pm 1\%$  диапазона измерения.

Микропроцессорные рН-метры выпускаются многими зарубежными фирмами, такие анализаторы входят в состав серии SIPAN (ф. Siemens), приборы серии 8701Т, 873, 875 (ф. Foxboro), мод. 97826 7096 (ф. Honeywell), PH150, PH202 (ф. Yokogawa), dTRANS рН 01 (ф. Jumo) и др.

При выпуске и эксплуатации рН-метров производится как раздельная поверка 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.

Поверка 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 измерительные преобразователи могут работать в комплекте с мембранными электродами ЭМ, селективными к ионам  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$ ,  $CN^-$ ,  $OH^-$ . Ионоселективными функциями по отношению к  $Na^+$  обладают электроды из натриевого стекла, для подавления их водородной функции в анализируемый раствор вводится буферный аммиачный раствор, стабилизирующий рН. Определитель натрия АН-012 имеет диапазоны измерения от 0,1...10 мкг/л до 1...1000 мг/л, предел приведенной погрешности

Таблица 17.5

Значения рН буферных растворов при температуре 25 °С

Буферный раствор	рН	Буферный раствор	рН
0,1 м раствор НСl	1,10	0,008695 м раствор однозамещенного фосфорнокислого калия ( $KH_2(C_2O_4)_2 \cdot 2H_2O$ )	7,41
0,05 м раствор тетраоксалата калия ( $KH_2(C_2O_4)_2 \cdot 2H_2O$ )	1,68	0,03043 м двухзамещенного фосфорнокислого натрия ( $Na_2HPO_4$ )	
Насыщенный при 25 °С раствор виннокислого калия $C_2H_4O_2(COOK)(COOH)$	3,56		
0,05 м раствор фталевокислого калия $C_6H_4O_2(COOK)(COOH)$	4,01	0,01 м раствор тетраборнокислого натрия ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ )	9,18
Раствор, содержащий 0,025 м фосфорнокислого однозамещенного калия ( $KH_2PO_4$ ) и 0,025 м фосфорнокислого двухзамещенного натрия ( $Na_2HPO_4$ )	6,86	Насыщенный при 25 °С раствор гидрата оксида кальция $Ca(OH)_2$	12,45

составляет  $\pm 2\%$ . Для измерения рNa фирма Honeywell выпускает анализаторы моделей 7972, 7082.

Хлоридомер АХП-205 имеет пределы измерения 1,5—3,5 рCl, dTRANS Fz 01 (ф. Jumo) поставляется с электродами для измерения свободного хлора, диоксида хлора и озона.

Для измерения окислительно-восстановительного потенциала (ORP) раствора применяются инертные металлические электроды, на поверхности которых не протекают электродные реакции, а осуществляется лишь контакт с раствором. В отечественных Eh-метрах в качестве рабочего электрода используется тонкослойный платиновый электрод, а в качестве электрода сравнения — хлорсеребряный. Поскольку при одинаковых окислительно-восстановительных свойствах Eh зависит от рН раствора, то обычно измерение первого показателя ведется параллельно с измерением второго.

Лабораторные потенциометрические преобразователи, называемые *иономерами*, являются универсальными приборами, снабжаемые 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-130 и переносные рН-125, П-210, П-215.

**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 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 называются 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 (см. § 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 интенсивность окраски раствора:

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\epsilon_\lambda LC} = I_{0\lambda} e^{-D_\lambda} \quad (17.7)$$

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 меньшие 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 растёт 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, фотоумножители. 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, фосфатомеры, измерители растворенного в воде кислорода, хлора и др.

Схема автоматического кремнемера ИКА111, выпускаемого НПП «Техноприбор» и предназначенного для измерения концентрации ионов  $\text{SiO}_3^{2-}$ , представлена на рис. 17.16. Эти приборы используются на тепловых и атомных электрических станциях при контроле качества химически обессоленной воды. Кремнемер содержит три

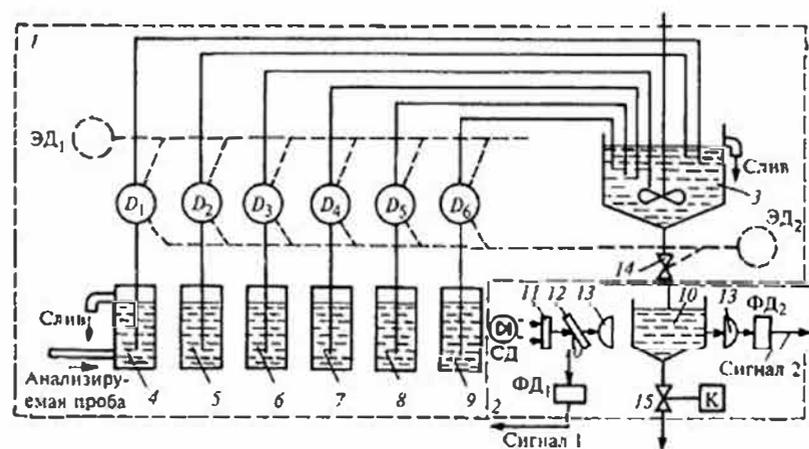


Рис. 17.16. Схема автоматического кремнемера:

1, 2 — гидравлический и фотометрический с двухканальной оптической системой блок; 3 — смеситель; 4 — сосуд постоянного уровня; 5, 6 — сосуды с чистой водой и калибровочным раствором; 7—9 — сосуды с молибдатом аммония, серной кислотой и восстановителем; 10 — измерительная кювета; 11 — светофильтр; 12 — светоделительная пластина; 13 — линзы; 14 — клапан; 15 — электрический клапан; ФД<sub>1</sub>, ФД<sub>2</sub> — фотодиоды; СД — светодиод; Д<sub>1</sub>—Д<sub>6</sub> — перистальтические насосы; ЭД<sub>1</sub>—ЭД<sub>2</sub> — электрические двигатели

блока: гидравлический 1, фотометрический с двухканальной оптической системой 2 и не показанный на схеме микропроцессорный блок (МБ) обработки сигналов и управления.

Кремнемер представляет собой прибор периодического действия, в котором два раза в час производятся измерения кремнесодержания анализируемого раствора и раз в четыре часа проводится операция контроля начальной и конечной точек диапазона измерения. Для выполнения этой операции используется чистая вода и калибровочный раствор, находящиеся соответственно в сосудах 5, 6. Анализируемая вода поступает из сосуда постоянного уровня 4. В сосудах 7—9 находятся молибдат аммония, серная кислота и восстановитель. Из всех сосудов растворы подаются в смеситель 3 перистальтическими насосами Д<sub>1</sub>—Д<sub>6</sub>. В смесителе 3 при перемешивании молибдата аммония с серной кислотой образуется реагент, меняющий свою окраску и ее интенсивность в присутствии ионов  $\text{SiO}_3^{2-}$  и восстановителя. Наличие мешалки в смесителе 3 обеспечивает однородность раствора и ускоряет реакцию, для завершения которой требуется 25—30 минут.

Для управления перистальтическими насосами и клапаном 14 используются два электродвигателя: ЭД<sub>1</sub> производит вращение насосов, а ЭД<sub>2</sub> управляет последовательностью их подключения. Общими двигателями управляет МБ.

Оптическая система прибора 2 включает измерительную кювету 10, источник света — светодиод СД, светофильтр 11, светоделительную пластину 12, линзы 13, светоприемники-фотодиоды ФД<sub>1</sub>, ФД<sub>2</sub>, формирующие опорный 1 и измерительный 2 сигналы. С помощью опорного сигнала компенсируется влияние нестабильности источника светового сигнала. Электрический клапан 15 производит периодический слив раствора из кюветы 10. Сигналы 1, 2 поступают в микропроцессорный блок. Элементы оптического и гидравлического каналов термостатированы.

При корректировке начальной точки диапазона измерения в смеситель 3 сливается молибдат аммония и серная кислота, они тщательно перемешиваются в течение нескольких минут, после чего к ним добавляется доза чистой воды, а затем восстановитель. После перемешивания раствор сливается в измерительную кювету 10. При коррекции конечной точки диапазона измерения выполняется та же последовательность операций, только используется калибровочный раствор. Благодаря проведению этих операций корректируется влияние загрязненности измерительной кюветы и изменения характеристик оптической системы и источника света. Отличие операции измерения от рассмотренных состоит только в использовании анализируемого раствора. Диапазоны измерения кремнемера составляют 2...1000 и 10...10000 мкг/л, относительная погрешность  $\pm 1\%$  при среднем квадратическом отклонении серии параллельных измерений 0,3%. Фотоколориметрические кремнемеры типа COPRA SILICA выпускает ф. SWAN.

К числу фотоколориметрических приборов относится жесткомер СОЖ-121, 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 темносиним 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 двухканальная оптическая система, в качестве лучеприемников применяются фотодиоды. Диапазон измерения жесткомера составляет 2...100 мкг-экв/кг.

На рассмотренном принципе действия работают фосфатомеры ИФА 112 и COPRA фирмы SWAN.

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, метод обладает высокой специфичностью и чувствительностью.

Количественная связь между интенсивностью спектральных линий  $I_\lambda$  и концентрацией вещества  $c$  определяется уравнением Ломакина—Шейбе

$$I_\lambda = ac^d, \lg I_\lambda = \lg a + d \lg c,$$

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, искровой 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 степень возбуждения атомов. В качестве измерительных элементов используются фотоумножители, фотодиоды. Этот метод обладает большой чувствительностью по отношению к атомам щелочных металлов, превышающей чувствительность других химических методов.

**Турбидиметрические и нефелометрические анализаторы.** Принцип действия турбидиметрических\* и нефелометрических приборов основан на измерении ослабленного или рассеянного излучения взвешенными частицами, находящимися в жидкости. Приборы градуируются в единицах либо оптической плотности  $D$ , либо коэф-

\* От слова turbid (англ.) — мутный.

фициента пропускания  $\tau$ , %. Если  $\Phi_0$  исходный световой поток, а  $\Phi$  — световой поток, прошедший через анализируемый раствор, то

$$D = \ln(\Phi_0/\Phi) = \ln[(U_0 - U_\tau)/(U - U_\tau)];$$

$$\tau = \Phi/\Phi_0 \cdot 100 = (U - U_\tau)/(U_0 - U_\tau) \cdot 100,$$

где  $U_0, U$  — электрические сигналы, пропорциональные  $\Phi_0, \Phi$ ;  $U_\tau$  — сигнал при неосвещенном приемнике излучения.

При прохождении светового потока  $\Phi_0$  через раствор, содержащий взвешенные частицы, поток ослабляется за счет поглощения его раствором и частицами. Если пренебречь поглощением потока растворителем, то между световым потоком  $\Phi_0$  на входе анализируемого раствора и потоком  $\Phi$  на его выходе существует следующее соотношение:

$$\lg(\Phi_0/\Phi) = kcb^d(d^\lambda + a\lambda^4),$$

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  $\lg(\Phi_0/\Phi)$  принимает вид закона Ламберта—Бера.

Градуировка турбидиметров производится по стандартным растворам, содержащим известную концентрацию взвешенных частиц, имеющих размеры и природу, близкие к анализируемым. 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 относятся сигнализаторы уровня осадков СУ-102, СУФ-210 и уровня шлама СУФ-5, 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 несбаланса измерительной схемы, подающийся на устройство сигнализации либо в цепь автоматической продувки аппарата.

Автоматические мутномеры М-101 градуируются в единицах изменения коэффициента пропускания и имеют пределы измерения от 10 до 100 % при основной приведенной погрешности  $\pm 4$  %. Датчики могут быть проточными и погружными. Анализаторы жидкости турбидиметрические АЖК-98 (ИЦ «Уралсемикондактор») имеют пределы измерения 0,3...53 мг/л (по каолину) при пределе приведенной погрешности  $\pm 2,5$  %, выпускаются в проточном и переносном вариантах.

**Нефелометрические анализаторы.** В нефелометрических анализаторах интенсивность потока излучения, рассеиваемого частицами, находящимися в растворе, определяется уравнением Релея в следующей упрощенной форме:

$$I_p = I_0 k N V / \lambda^4,$$

где  $I_0$ ,  $I_p$  — начальный и рассеянный потоки излучения;  $V$ ,  $N$  — объем шаровой частицы и их число;  $\lambda$  — длина волны;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Нефелометры в основном используются для анализа эмульсий и, в частности, для измерения содержания нефтепродуктов в сбросных водах.

Схема оптического блока микропроцессорного анализатора жидкости «Флюорат-02» (ф. «Эконикс»), содержащая три оптических канала: опорный, пропускания, люминесцентный, представлена на рис. 17.17. Излучение ксеноновой лампы 1, работающей в импульсном режиме, проходит через линзу 2, светофильтр 3 и светоделительную пластину 6. Сигнал фотоумножителя 7 является опорным, характеризующим световой поток  $\Phi_0$ . Ослабленный световой поток, прошедший через измерительную кювету 4, попадет на фотоумножитель 5 (канал пропус-

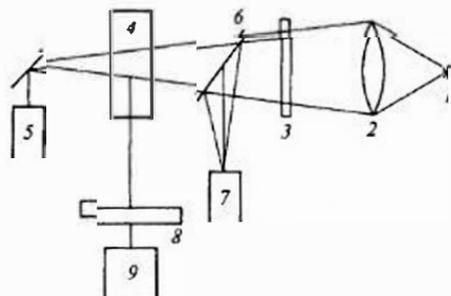


Рис. 17.17. Схема оптического блока анализатора «Флюорат»:

1 — ксеноновая лампа; 2 — линза; 3 — светофильтр; 4 — измерительная кювета; 5, 7, 9 — фотоумножители; 6 — светоделительная пластина; 8 — светофильтр

кания). На фотоумножитель 9 через светофильтр 8 поступает либо рассеянный световой поток, либо потоки, связанные с люминесцентным или хемилюминесцентным излучением частиц, находящихся в растворе. Спектральный диапазон оптического излучения составляет 200...650 нм. Коэффициент пропускания может меняться от 10 до 100 % при погрешности не более 2 %. Память прибора содержит меню по 32 характерным методикам измерения и калибровочные коэффициенты по каждой методике. Для их реализации используется набор светофильтров, различные измерительные кюветы, красители. В круг содержащихся в воде анализируемых веществ входят: нефтепродукты, сульфиды, нитраты, железо, медь и др. Для упомянутых веществ нижние пределы измерения составляют соответственно в мг/л 0,005; 0,0005; 0,005; 0,05; 0,005.

Анализаторы жидкости нефелометрические АЖН-98 (ИЦ «Уралсемикондактор») выпускаются в погружном и проточном вариантах, имеют пределы измерения 0,05...12 г/л (по каолину) при пределе приведенной погрешности  $\pm 4$  %.

## 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 используются несколько методов. Для анализа микроконцентраций растворенного кислорода применяются амперометрические, кондуктометрические и колориметрические методы. При концентрациях, составляющих мг/л, используется термокондуктометрический метод.

**Амперометрические 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 § 16.6, поскольку метод используется также при анализе состава газов.

Действующее напряжение  $E$  в цепи, содержащей погруженные в раствор электроды, может создаваться за счет внешнего или внутреннего источника, последним служит гальваническая пара электрод-

дов. 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 применяются 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  $\text{pH} = 8 \dots 10$ . В таких средах скорость восстановления кислорода на катоде на три порядка выше, чем в кислом электролите.

Схема мембранного амперметрического кислородомера КМА-08М.3, выпускаемого НИИП «Техноприбор», представлена на рис. 17.18. Гальванический элемент образуется цинковым 1 (анод) и угольным 2 (катод) электродами. Угольный электрод поляризован. Пространство между электродами заполнено буферным раствором 3. Кислород из анализируемой воды 4 диффундирует через мембрану 5 в

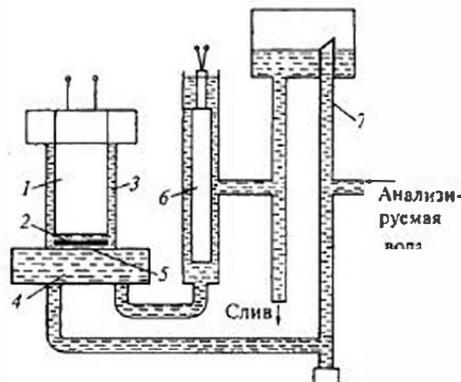


Рис. 17.18. Схема мембранного амперметрического кислородомера:

1, 2 — цинковый и угольный электроды; 3 — буферный раствор; 4 — анализируемая вода; 5 — мембрана; 6 — медное сопротивление; 7 — напорная трубка

буферный раствор 3. При этом кислород восстанавливается на катоде, образуя ионы  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}^+$ . Величина тока, протекающего во внешней цепи преобразователя, пропорциональна концентрации кислорода. Для коррекции влияния температуры на сигнал преобразователя используется медный термопреобразователь сопротивления 6. Анализируемая вода поступает в измерительную ячейку под постоянным давлением, создаваемым напорной трубкой 7. Кислородомер имеет четыре диапазона

измерения. При нижнем пределе 0 верхние пределы составляют 19,99; 199,9; 1999; 19990 мкг/л. Прибор имеет автоматическое переключение диапазонов измерения, предел основной приведенной погрешности составляет  $\pm 4\%$ .

Растворенный в воде кислород измеряют анализаторы серии SIPAN (ф. Siemens); 871DO, 873DO (ф. Foxboro); 7021, 7022 (ф. Honeywell) и др.

*Измерение растворенного в воде водорода.* 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. Водородомер АВ-09 (НИИП «Техноприбор») включает мембранный преобразователь, совпадающий по конструкции с представленным на рис. 17.18 преобразователем кислородомера. Различие состоит в материале электродов и типе буферного раствора. Водородомер имеет пределы измерения 0...20; 20...200; 200...2000 мкг/л при погрешности измерения  $\pm 4\%$ . Прибор имеет цифровой индикатор и токовый выходной сигнал 0...5 (4...20) мА.

## 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.

Первичные преобразователи, рассмотренных анализаторов жидкостей, при соответствующих параметрах среды по температуре и давлению 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 непредставительных результатов измерения. Они вызываются неоднородностью состава жидкости по высоте резервуара или сечению трубопровода. Последнее более вероятно при ламинарном течении потока, чем при турбу-

лентном. 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 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, применяется трубчатый зонд, схема которого для отбора пробы перегретого пара представлена на рис. 17.19, а. Трубка со скосом  $45^\circ$  навстречу 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. 17.19, б). 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 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

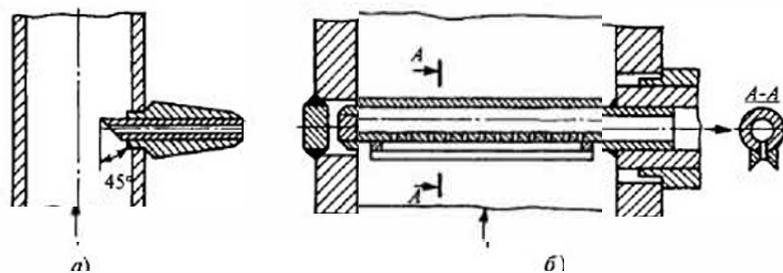


Рис. 17.19. Схема трубчатого (а) и щелевого (б) зондов

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 пропускания 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 выполняют из коррозионно-стойких материалов. Для линий анализаторов жидкостей в основном используются бесшовные жесткотянутые и холоднокатаные 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. 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 растворенных 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 вследствие использования сосудов с перетоком, называемых напорными.

В анализаторах жидкостей используются разнообразные побудители расхода: диафрагменные, ротационные, перистальтические. Визуальный контроль за постоянством расхода обычно осуществляется ротаметрами.

Применяются 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 трудосемко.

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 электростанциях приборы химического контроля пароводяного тракта энергоблоков обычно находятся в отдельном помещении. Наличие в микропроцессорных анализаторах интерфейсов RS-232, RS-485 позволяет создавать системы химического контроля, интегрированные в локальные сети электростанций.

На тепловых и атомных электрических станциях для подготовки проб используются устройства УПП (рис. 17.20). Из пробоотборного зонда 1 анализируемая проба последовательно проходит следующие устройства: запорный вентиль 2, холодильник 3, регулировочный вентиль 4, набор дроссельных шайб 5, водяной холодильник 6, электромагнитный клапан 7, бак постоянного уровня 8. Температура в баке измеряется контактным термопреобразователем, при достижении 40 °С термоограничитель 9 сигнализирует о превышении температуры и закрывает клапан 7, прекращая подачу пробы в анализатор. Комплект устройств УПП-ТП (НПП «Техноприбор») обеспечивает подачу пробы до 100 л/ч с температурой не более 40 °С и давлением 0,16 МПа.

Автоматический химический контроль теплоносителя первого контура АЭС с реакторами ВВЭР затруднен высоким уровнем радиоактивности, 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 так же, как на тепловых электростанциях. Отличие состоит в том, что выпар из бака постоянного уровня УПП направляется в систему газовых сдувок. Техническое обслуживание и ремонт анализаторов осуществляются в соответствии с действующими на АЭС правилами.

### Контрольные вопросы

1. Чем обусловлено влияние температуры на показания кондуктометров?
2. Каким током питается первичный преобразователь кондуктометров и почему?
3. Какие первичные преобразователи кондуктометров вы знаете?

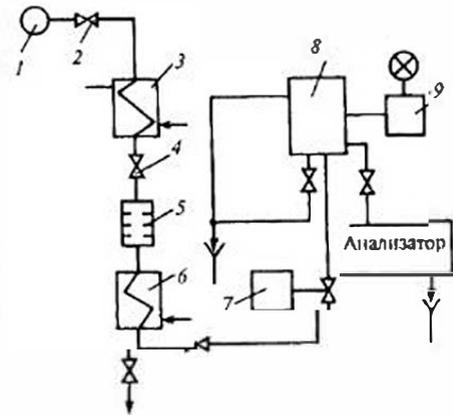


Рис. 17.20. Схема устройства подготовки пробы: 1 — пробоотборный зонд; 2 — запорный вентиль; 3 — холодильник; 4 — регулировочный вентиль; 5 — набор дроссельных шайб; 6 — водяной холодильник; 7 — электромагнитный клапан; 8 — бак постоянного уровня; 9 — термоограничитель

4. Можно ли с помощью кондуктометра измерить концентрацию ионов жесткости в воде водоема?
5. Чем обусловлена чувствительность рабочего стеклянного электрода к концентрации ионов водорода в растворе?
6. Какие требования предъявляются к характеристикам вспомогательного электрода?
7. Объясните наличие изопотенциальной точки у градуировочных характеристик электродной системы рН-метра.
8. Каковы особенности вторичных приборов, измеряющих сигнал электродной системы рН-метра?
9. Каково назначение иономеров?
10. Принцип действия автоматического колориметра.
11. Каким образом в фотоколориметрах учитывается влияние загрязнения измерительной кюветы?
12. В чем суть амперметрического метода измерения растворенных в воде кислорода и водорода?

---

## Раздел пятый

# СИСТЕМЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

---

### Глава восемнадцатая

## СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

### 18.1. Информационные функции АСУ ТП

Рассмотренные средства измерения теплотехнических величин применяются 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, применяемых 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 параметров, свыше 1000 регулирующих блоков, 120 локальных контуров регулирования.

Количественный рост контролируемых и регулируемых величин обусловил качественное изменение структуры АСУ ТП, выразившееся в использовании информационных и управляющих вычислительных машин, функционально-группового управления. Такого типа АСУ ТП, работающие в настоящее время на многих энергоблоках тепловых и атомных электростанций, представляют человеко-машинный комплекс, в структуру которого входят следующие подсистемы: информационно-измерительная, технологической сигнализации, дистанционного управления, автоматического регулирования и технологических защит [40—43]. 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.

Стремительное развитие микроэлектроники, внедрение микропроцессоров привели к быстрому изменению структуры АСУ ТП ТЭС и АЭС, промышленных предприятий, отказу от централизованных систем управления и переходу к распределенным системам. Представителями таких систем являются программно-технические комплексы (ПТК) «Квинт», разработанный НИИТеплоприбором, Teleperm ф. Siemens и др. В настоящее время мы являемся свидетелями перехода к новым системам управления Fieldbus Foundation производственными процессами и объектами, основанными на использовании интеллектуальных средств измерения и сервоприводов, подключенных к высокоскоростной полевой шине (Fieldbus). Следующей тенденцией, которая наблюдается в настоящее время, является использование на полевом уровне шин Ethernet и даже полевых устройств, сопрягаемых с Internet.

Поскольку переход к каждой новой структуре управления происходит за короткий отрезок времени и требует больших затрат как на техническое перевооружение, так и на подготовку обслуживающего персонала, то в настоящее время на объектах энергетики в зависимости от времени их ввода и модернизации можно встретить все структуры управления, начиная от индивидуального управления котлом и турбиной до систем «Квинт» или Teleperm управления энергоблоком.

В зависимости от важности измеряемого параметра и сложности технологического объекта используются несколько способов передачи, преобразования и представления измерительной информации опе-

ратуру (рис. 18.1). Рассматриваемые структуры применяются на технических объектах различной сложности, имеющих щиты управления (ЩУ). Ввиду большого распространения электрических систем

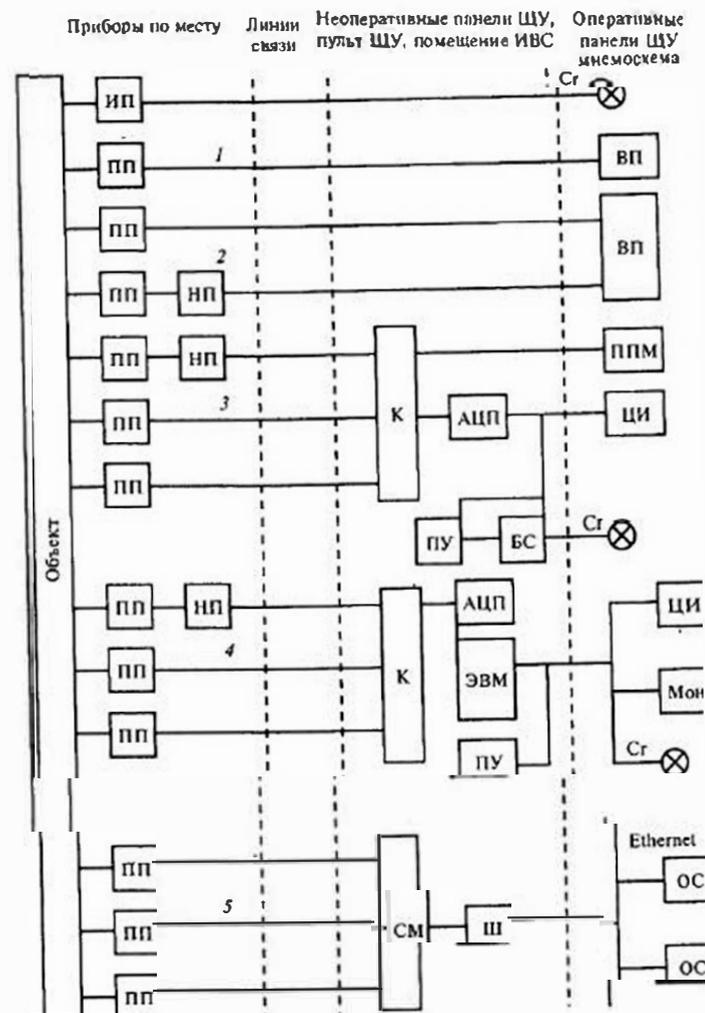


Рис. 18.1. Структура преобразования и представления измерительной информации: ПП, НП — первичный и нормирующий преобразователи; ИП — измерительные приборы; К — коммутатор; ПУ — печатающее устройство; СМ — системный модуль; Ш — шлюз; ОС — операторская станция; БС — блок сравнения; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ВП — вторичные приборы; ЦИ — цифровой индикатор; ППМ — прибор многоканальный

преобразования, передачи 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): термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических, преобразователей давления, разности давлений, расхода, анализаторов состава жидкостей и газов производятся измерения и преобразование соответствующих величин в аналоговые электрические сигналы. К системе индивидуального контроля параметров относится система 1, в которой сигналы от первичных преобразователей (ПП) поступают на показывающие или самопишущие вторичные приборы (ВП), с помощью которых может также осуществляться сигнализация предельных отклонений контролируемых величин. К системе индивидуального контроля относятся устанавливаемые у технологического объекта показывающие и самопишущие измерительные приборы (ИП), сигнал которых об отклонении параметра поступает на щит управления. К числу таких приборов относятся манометры, дифманометры, манометрические термометры. В случае, если щит управления находится вблизи объекта, измерительные приборы могут размещаться на щите, если это допускается правилами технической эксплуатации.

При множественном контроле параметров в системе 2 для измерения однотипных сигналов первичных преобразователей используется один вторичный показывающий или регистрирующий прибор. Для унификации сигналов первичных преобразователей используются нормирующие преобразователи (НП). Коммутация входных цепей вторичного прибора осуществляется ручными или автоматическими переключателями (коммутаторами), последние обычно встраиваются во вторичный прибор. В последнее время коммутация сигналов первичных преобразователей может производиться в цифровых блоках нормализации (см. § 8.2, коммутатор «Метран-900»), устанавливаемых вблизи первичных преобразователей. К вторичным устройствам идут только два провода, что позволяет экономить монтажный провод. Рассмотренные системы передачи и преобразования сигналов используются в системах управления объектами любой сложности. У наиболее простых на их основе осуществляется представление всей информации о ходе технологического процесса и состоянии оборудования.

Дальнейшее развитие измерительной системы связано с усложнением технологических объектов и увеличением объема информации, необходимой для их управления. Представление информации с помощью рассмотренных систем 1, 2 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 1 наиболее ответственных величин, а также систем 2 основная масса параметров измеряется с помощью системы 3 централизованного контроля (СЦК). При использовании этой системы информация представляется с помощью аналоговых многошкальных приборов ППМ, цифровых индикаторов (ЦИ) и регистрируется электрическими печатающими устройствами (ПУ). Коммутатор (К) обеспечивает подключение выходов ПП и НП к ППМ, аналого-цифровому преобразователю (АЦП). В блоке сравнения (БС) измеряемая величина сравнивается с заданным значением (уставкой), при достижении которого срабатывает сигнализация и ПУ регистрирует отклонение. 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.

Следующий шаг на пути развития информационных систем — включение в их структуру вычислительных машин, что расширило их функциональные возможности. С помощью ЭВМ производится расчет технико-экономических показателей работы объекта, осуществляется контроль нахождения параметров в заданных пределах, ведется по определенным алгоритмам обработка измерительной информации в целях диагностики технических ситуаций и анализа состояния объекта, его элементов, производится регистрация аварийных ситуаций.

Последовательность преобразования и представления информации с использованием ЭВМ изображены на структуре 4 (см. рис. 18.1). Группа коммутаторов осуществляет последовательное подключение к АЦП выходов первичных и нормирующих преобразователей. Сигналы в цифровой форме вводятся в ЭВМ. Значения измеряемых величин, результаты расчета технико-экономических показателей, анализа состояния объекта и его элементов представляются оператору на мониторе Мон, выводятся на цифропечать, отклонения измеряемых величин сигнализируются. На экраны мониторов выводится буквенно-цифровая и графическая информация,

высвечиваются изображения фрагментов мнемосхем, на которые накладывается информация о значениях измеряемых параметров.

Использование для преобразования и представления информации структуры 4 не исключает применения индивидуального контроля наиболее ответственных параметров. Благодаря их сочетанию достигается высокая надежность выполнения информационной функции АСУ ТП.

Структура 5 (см. рис. 18.1) соответствует микропроцессорному ПТК «Квинт» [44]. В этом комплексе сигналы от первичных преобразователей поступают в микропроцессорные контроллеры, связанные контроллерной сетью и объединенные в системные модули (СМ). Контроллеры производят всю совокупность обработки сигналов: фильтрацию, усреднение, линеаризацию, проверку достоверности и т.д. Через шлюзы (Ш) системные модули соединяются с системой шин Ethernet. К этой шине подключены операторские станции (ОС), представляющие операторам всю информацию о ходе технологического процесса и состоянии оборудования, к ней же могут быть подключены абоненты, управляющие электростанцией или промышленным предприятием.

В представленных на рис. 18.1 структурах рассмотрено преобразование аналоговой и цифровой измерительной информации о значениях теплотехнических величин. Помимо нее большое место занимает дискретная и аналоговая информация, необходимая для ведения технологического процесса и дающая оператору сведения о положении запорных и регулирующих органов, включении и выключении механизмов. Эти вопросы выходят за рамки данного курса. Реальные системы, соответствующие структурам 3—5, включают значительное число элементов, не показанных на схеме и связанных с синхронизацией и управлением их работой, организацией ввода и вывода информации из ЭВМ.

Более полное представление об объеме измерительной информации, обеспечивающей работу энергоблока, последовательности ее передачи, преобразования и представления оператору дает приведенная на рис. 18.2 структура АСУ ТП на базе ПТК «Квинт» [45]. Система построена по иерархическому принципу. Нижний уровень образуют микропроцессорные контроллеры К, на которые поступают сигналы от первичных измерительных преобразователей, аналоговая и дискретная информация о положении регулирующей и запорной арматуры. Последние управляются контроллерами через силовые преобразователи (СП). Для регистрации событий с точной привязкой по времени используется регистрирующий контроллер РАС.

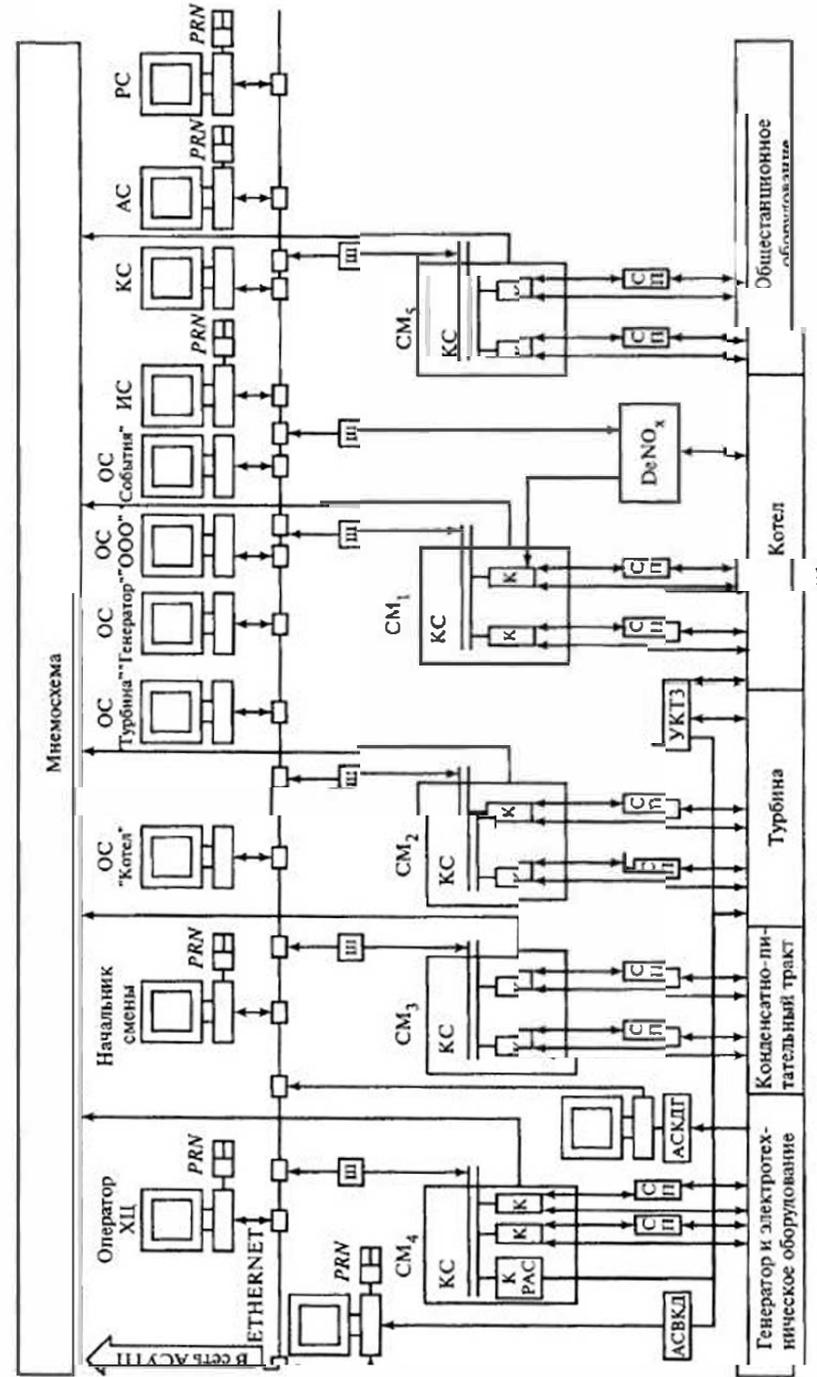


Рис. 18.1 Структура АСУ ТП энергоблока № 5

Группы контроллеров объединяются в системные модули (СМ), каждый из которых обслуживает технологический элемент энергоблока: котел, турбину, конденсационно-питательный тракт, генератор и электрическое оборудование, общестанционное оборудование. В составе АСУ ТП изображены элементы, не входящие в ПТК «Квинт». К их числу относятся системы контроля и диагностики генератора АСКДГ, турбогенератора АСВКД, специализированные контроллеры управления азотоочисткой  $DeNO_x$  и комплектные устройства технологических защит УКТЗ.

Контроллерная сеть (КС) системных модулей через шлюзы связана с системной сетью Ethernet, по которой осуществляется обмен информацией между контроллерами и станциями обработки и представления информации верхнего уровня, включающие ПЭВМ, совместимые с IBM. У рассматриваемой АСУ ТП верхний уровень содержит одиннадцать станций: четыре оперативных ОС для дежурного персонала, станцию регистрации событий, станции начальника смены и оператора химцеха, две инженерные станции персонала, обслуживающего ПТК, станции архивирования (АС) и расчетов (РС). ПЭВМ управляются манипуляторами PRM типа «Мышь» и с клавиатуры.

В АСУ ТП на базе ПТК «Квинт» выполняются следующие информационные функции:

1) сбор и обработка первичной информации. С периодичностью 0,5...0,7 с контроллеры производят опрос первичных приборов. Каждый сигнал проверяется на достоверность, после чего производится его обработка, заключающаяся в линеаризации, масштабировании, фильтрации, усреднении, введении поправки на изменение температуры свободных концов термоэлектрических преобразователей;

2) представление оператору информации о текущих значениях технологических величин. Обработанная информация дается оператору с экранов цветных мониторов и приборов, установленных на блочном щите управления. Информация на экране монитора может представляться либо в виде числового значения на видеодиаграмме, либо в виде графика изменений измеряемой величины во времени;

3) сигнализация оператору в виде звукового и светового сигнала об отклонениях технологической величины за пределы допустимых значений. Сигнализация производится с использованием мнемосхем и светового табло на блочном щите управления, экранов операторского и событийного мониторов. В верхней части экрана монитора, называемой системной областью, независимо от установленной на экране видеодиаграммы, при отклонении параметра

начинает мигать небольшой квадрат — индикатор ошибки. Поместив курсор в этот квадрат и нажав клавишу «мыши», вызывается список имеющих место отклонений параметров (ошибок). Через этот список производится вызов видеодиаграммы элемента энергоблока, содержащего ошибку. На видеодиаграмме неблагоприятный элемент выделяется изменением цвета или миганием. Для более быстрого вызова на экран необходимой видеодиаграммы в его нижней части размещены рецепторы с условным изображением наиболее ответственных элементов энергоблока. Оператор может вызвать на экран нужный элемент энергоблока, набирая его номер на функциональной клавиатуре;

4) расчет и анализ технико-экономических показателей (ТЭП) энергоблока производятся для интервалов времени 15 мин, 8 и 24 ч, 10 дней и 1 мес. По запросу оператору дается информация о пережоге топлива;

5) архивация, хранение и представление ретроспективной информации;

6) регистрация аварийных событий, анализ действия защит;

7) техническая диагностика состояния технологического оборудования. На энергоблоке контролируется термонапряженное состояние турбины, вибрация турбогенератора, состояние концевых уплотнений турбины и пр.

Для удобства наладки и обслуживания АСУ ТП, повышения ее надежности предусмотрены тестирование и самодиагностика состояния ее элементов, метрологическая аттестация и поверка измерительных каналов.

В системе Fieldbus Foundation, использующей высокоскоростную полевою шину Fieldbus и интеллектуальные первичные приборы и сервомеханизмы с интерфейсом Profibus, вся обработка сигналов первичной информации и формирование управляющих воздействий перенесены на нижний уровень. Системные модули, присутствующие на рис. 18.2, заменяются станциями управления технологическими участками, которые соединены V-сетью. Последняя сервером связи подключается к шине Ethernet, объединяющей операторские станции.

В рассмотренных системах СЦК, ИВС, ПТК последовательно включенные элементы, передающие, преобразующие и представляющие измерительную информацию образуют измерительные каналы. Одним из основных признаков этих систем является наличие комплекса метрологических характеристик, относящихся к выполняемым ими функциям: контроля и сигнализации, расчета ТЭП и других величин, базирующихся на метрологических характеристиках

измерительных каналов, участвующих в реализации перечисленных функций. В СЦК, ИВС, ПТК помимо представленных первичных и нормирующих преобразователей, вторичных приборов используются линии связи, коммутирующие устройства, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, микро и мини-ЭВМ, адаптеры, модемы, шлюзы, средства представления цифровой информации: дисплеи, цифровые индикаторы, цифropечатающие устройства (см. § 8.3).

## 18.2. Элементы измерительных каналов

Информация первичных средств измерения передается в большинстве случаев с помощью токовых и импульсных сигналов. При использовании токового унифицированного сигнала в отличие от передачи информации на переменном токе повышается помехоустойчивость линий в результате сравнительно простых способов фильтрации наводок. Важным в таких цепях, как и в цепях передачи сигналов от термопреобразователей, является гальваническое разделение цепей. В связи с этим в измерительных каналах, как правило, присутствуют устройства гальванического разделения. При использовании микропроцессорных первичных приборов и вторичных устройств применяются различные интерфейсы и устройства, осуществляющие соответствующее преобразование сигналов. Для передачи цифрового сигнала требуется использование кабеля с определенными характеристиками по величине емкостного и активного сопротивлений. Увеличение длины линии ведет к искажению сигнала и снижению скорости передачи информации. В связи с этим для каждого типа интерфейса определяются в зависимости от типа кабеля его длина при работе без повторителей и снижение скорости передачи (см. § 8.3).

В рассматриваемых системах для периодического подключения источников аналоговых и дискретных сигналов используются контактные и бесконтактные коммутаторы аналоговых сигналов [46]. Первые, являясь идеальными переключателями, не создают погрешностей при коммутации, однако обладают низким быстродействием. Бесконтактные коммутаторы, выполняемые на полупроводниковых элементах, обладают высоким быстродействием, но могут служить источниками дополнительных погрешностей. В устройствах связи с объектом управляющих и информационных вычислительных машин в основном используются коммутирующие устройства второго

типа, поскольку как было отмечено выше микропроцессорные АЦП включают коммутатор (мультиплексор) и усилители с широким диапазоном изменения коэффициента усиления. Последующее гальваническое разделение импульсных сигналов с использованием оптронов не вызывает затруднений. Погрешность АЦП, работающих в составе устройств связи ЭВМ с объектом, составляет 0,01...0,1 %.

Погрешность выполнения машинами вычислительных операций, осуществляемых с 32-разрядными двоичными словами, зависит от алгоритма вычислений и обычно бывает пренебрежимо малой по сравнению с погрешностями остальных элементов измерительных каналов.

Для представления цифровой информации применяются алфавитно-цифровые печатающие устройства, цифровые индикаторы и мониторы. Скорость печати составляет 100—180 знаков в секунду. Цифровая индикация осуществляется с помощью электромеханических табло и индикаторов, использующих газоразрядные лампы и электролюминесцентные сегменты. На экране монитора информация может представляться в виде таблиц, графиков, фрагментов мнемосхем. Преимуществом такого представления информации по сравнению с другими является возможность ее концентрации в сочетании с наглядностью. Так, мониторы, в зависимости от размера экрана, могут представлять от 500 до 2200 знаков. Вызов на него информации осуществляется с клавиатуры или «мышью».

Одной из наиболее рациональных форм представления информации с использованием монитора 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. В качестве примера на рис. 18.3 представлен один из наиболее простых фрагментов мнемосхемы энергоблока —

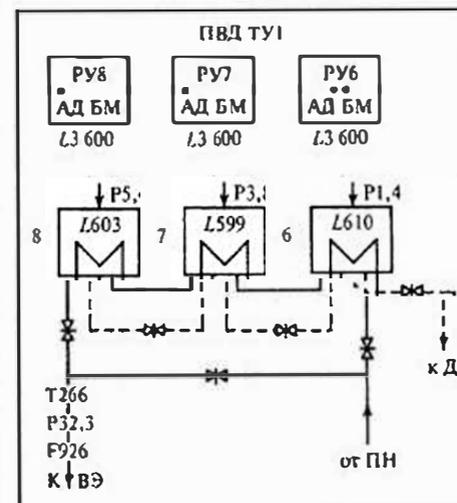


Рис. 18.3. Мнемосхема подогревателей высокого давления

мнемосхема подогревателей высокого давления ПВД блока 300 МВт с турбиной К-300/240. От питательных насосов (ПН) 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 ПВД8 в ПВД7 и затем в ПВД6, откуда направляется в деаэрактор (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 РУ6 — РУ8. Светящиеся над буквами АД квадраты показывают, как регулируется уровень — автоматически или дистанционно оператором. Квадраты над буквами БМ высвечиваются, если уровень в ПВД выходит из зоны допустимых значений в ту или другую сторону. Под условным изображением регуляторов указано заданное значение уровня  $L_3$ . В центре мнемосхемы изображены подогреватели ПВД. Стрелками показан подвод пара, рядом с ним дается динамическая информация о давлении пара в отборах  $p$ , МПа.

Внутри условного обозначения ПВД показано текущее значение уровня  $L$ . В нижней части мнемосхемы оператору дается информация о расходе  $F$  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 цифрочитающих устройств, цифровых табло и мониторов не вносит в нее погрешностей. Ошибки, обусловленные сбоями в работе перечисленных устройств, в данном случае не рассматриваются.

### 18.3. Анализ качества реализации информационно-измерительной функции АСУ ТП

В результате проведенного анализа структуры реализации информационной функции возможно более подробно, чем в § 18.1, остановиться на ее составляющих и методах оценки метрологических характеристик их выполнения. Последние основываются

на учете характеристик всех элементов, входящих в измерительные каналы, включая трубные и проводные линии связи.

**Индивидуальный контроль.** 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 регистрирующими. Во многих случаях показания средств индивидуального контроля используются для расчета потребления и производства энергоресурсов. При применении индивидуальных средств контроля имеет место максимальное быстродействие и надежность измерения, поскольку измерительные каналы включают минимальное число преобразующих элементов: первичный прибор или преобразователь, линии связи, вторичный прибор. В § 2.4 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 окружающей среды, напряжение питания, продолжительность работы и пр.

Первая методика, базирующаяся на алгебраическом или геометрическом (2.14), (2.15) суммировании предельных значений погрешностей 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. Формулы (2.14), (2.15) не обеспечивают требуемой точности расчета, поскольку приводимые в технической документации предельные значения допусковых 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 взаимно корреляционных 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, соответствующих структуре 2 (см. рис. 18.1), занимает промежуточное положение между индивидуальным и множественным контролем, реализуемым в СЦК. Обычно он используется для измерения и регистрации параметров, значение которых меняется в переходных режимах, при пуске или остановке оборудования. На энергоблоках многоточечные регистрирующие приборы до сих пор 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 переключателей приводит к существенному снижению надежности вторичных приборов, тогда как погрешность измерения в принципе не отличается от погрешности индивидуального контроля при обеспечении гальванического разделения сигналов каждого из первичных преобразователей. В противном случае возникают паразитные цепи, которые могут существенно изменить измеряемые сигналы и привести к погрешностям показаний.

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 или задающих сигналов.

**Системы и сети приборов централизованного контроля.** В системах централизованного контроля различных технологических объектов преобразование аналоговых сигналов в цифровой код расширяет возможности системы с точки зрения передачи, форм отображения, регистрации цифровой информации и ее обработки. Хотя цифровые индикаторы и регистраторы при выборе достаточного числа разрядов не создают погрешностей, нормирующие преобразователи, коммутаторы и аналого-цифровые преобразователи такие

погрешности вносят. При объединении в сеть приборов с цифровым выходом нагрузка цепи, зависящая от типа кабеля и числа работающих на сеть приборов, влияет на пропускную способность сети и амплитуду передаваемых импульсных сигналов. Так, для RS-485 количество подключенных к сети приборов не должно превышать 32, при большем числе необходимо использовать повторители.

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  $\pm 0,5\%$ . Без учета погрешностей, вносимых проводными линиями связи, предельная погрешность комплекта, рассчитанная по (2.15) для  $\rho = 0,95$ , составляет  $\pm 1,2\%$ . Измерительный канал СЦК включает, кроме первичного прибора, нормирующий преобразователь, коммутатор с АЦП, имеющих погрешности соответственно  $\pm 0,5$ ,  $\pm 0,1\%$ . Результирующая погрешность измерительного канала составляет  $\pm 1,22\%$ .

Таким образом, результирующие погрешности каналов индивидуального и централизованного контроля при принятых погрешностях элементов практически совпадают. Реально во втором случае они могут быть даже ниже, поскольку в микропроцессорных универсальных преобразователях выполняется линсаризация, точнее осуществляется компенсация изменения температуры свободных концов, извлечения квадратного корня и другие операции. Введение в измерительный канал дополнительных элементов влияет на его надежность. В связи с этим очевидна важность использования первичных преобразователей с унифицированным токовым или цифровым выходными сигналами, обеспечивающими сокращение числа преобразователей, входящих в измерительный канал.

#### **Информационно-вычислительные системы (ИВС), ПТК**

Одной из основных функций этих систем помимо представления информации о ходе технологических процессов является расчет технико-экономических показателей (ТЭП) работы технологического оборудования, выполняемый в темпе с ходом технологического процесса. Диагностика состояния оборудования является другим важным направлением использования ИВС и ПТК. Так, в АСУ ТП энергоблоков выполняются расчеты состояния проточной части турбины, отложений на парогенерирующих поверхностях котла и теплообменных трубках конденсатора 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 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:

$$\eta_k^{бр} = (Q_k^{бр} \cdot 10^2) / (B_k \cdot 2,931), \quad (18.1)$$

где  $Q_k^{бр}$  — теплопроизводительность котла, ГДж/ч;  $B_k$  — количество сожженного условного топлива, т/ч.

Теплопроизводительность котла

$$Q_k^{бр} = D_{п.п}(i_{п.п} - i_{п.в}) + D_{в.п}(i_{в.п}'' - i_{в.п}') + Q_k^{от} + Q_{раст} + Q_{проч}, \quad (18.2)$$

где  $D_{п.п}$ ,  $D_{в.п}$  — расходы перегретого и вторичного пара, т/ч;  $i_{п.п}$ ,  $i_{п.в}$ ,  $i_{в.п}''$ ,  $i_{в.п}'$  — 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  $B_k$  измеряется с помощью сужающих устройств и пересчитывается в расход условного топлива по теплоте сгорания  $q_{у.т}$ , определяемой в месте измерения расхода по формуле

$$B_k = B_{II}(q_{II}/q_{у.т}),$$

где  $q_{у.т} = 29,31$  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 определения  $D_{п.п}$ ,  $D_{в.п}$  и  $B_k$  используется уравнение расхода для сжимаемых сред (12.13), (12.14) с учетом фактической плотности при температурах  $t_{п.п}$ ,  $t_{п.п}'$ ,  $t_{в.п}$ ,  $t_{газ}$  и давлениях  $p_{п.п}$ ,  $p_{в.п}'$ ,  $p_{в.п}$ ,  $p_{газ}$ .

Расчет плотности, энтальпий производится в функции давления и температуры для газа, воды, пара по формулам, приведенным

в соответствующих стандартах. 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. Между теплотой, вводимой с топливом и выводимой с первичным и вторичным паром, существует временной сдвиг, зависящий от динамических свойств котла, связанных с его тепловой инерцией. 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  $\eta_k^{бр}$ , 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  $\partial \eta_k^{бр} / \partial B_k$ ,  $\partial \eta_k^{бр} / \partial q_{у.т}$ ,  $\partial \eta_k^{бр} / \partial D_{п.п}$ ,  $\partial \eta_k^{бр} / \partial D_{в.п}$ ,  $\partial \eta_k^{бр} / \partial t_{п.п}$  и прочие являются весовыми коэффициентами, определяющими влияние той или иной величины и погрешности ее измерения на расчетный экономический показатель и его погрешность. Анализ приведенных соотношений для  $\partial \eta_k^{бр}$  — показывает, что на погрешность его расчета определяющее влияние оказывают погрешности 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 в гл. 2, значения погрешностей различных средств измерения приведены в главах, посвященных рассмотрению соответствующих методов измерения теплотехнических величин и средств измерения. Результирующая погрешность определения ТЭП рассчитывается по формуле оценки погрешности результатов косвенных измерений (2.18).

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 предшествует проверка по специальным программам достоверности информации, использующая связь между технологическими параметрами объекта.

#### 18.4. Принципы построения функциональных схем теплотехнического контроля

Проектирование любого теплового объекта сопровождается разработкой принципиальных схем теплотехнического контроля и автоматического 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 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 разработаны системы автоматического проектирования (САПР) АСУ ТП, которые включены в ПТК и SCADA системы.

Исполнение принципиальных схем в настоящее время осуществляется в соответствии с ГОСТ 21.404-85 в двух вариантах [47]. Рассмотрим схему теплотехнического контроля подогревателей высокого давления ПВД, обогреваемых паром отборов турбины. Принцип действия ПВД рассмотрен в § 18.2 при анализе вызываемой

на монитор мнемосхемы. Изображенная на рис. 18.4 схема теплотехнического контроля основана на использовании вторичных показывающих и регистрирующих приборов, многошкального потенциометра. 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. Пред-

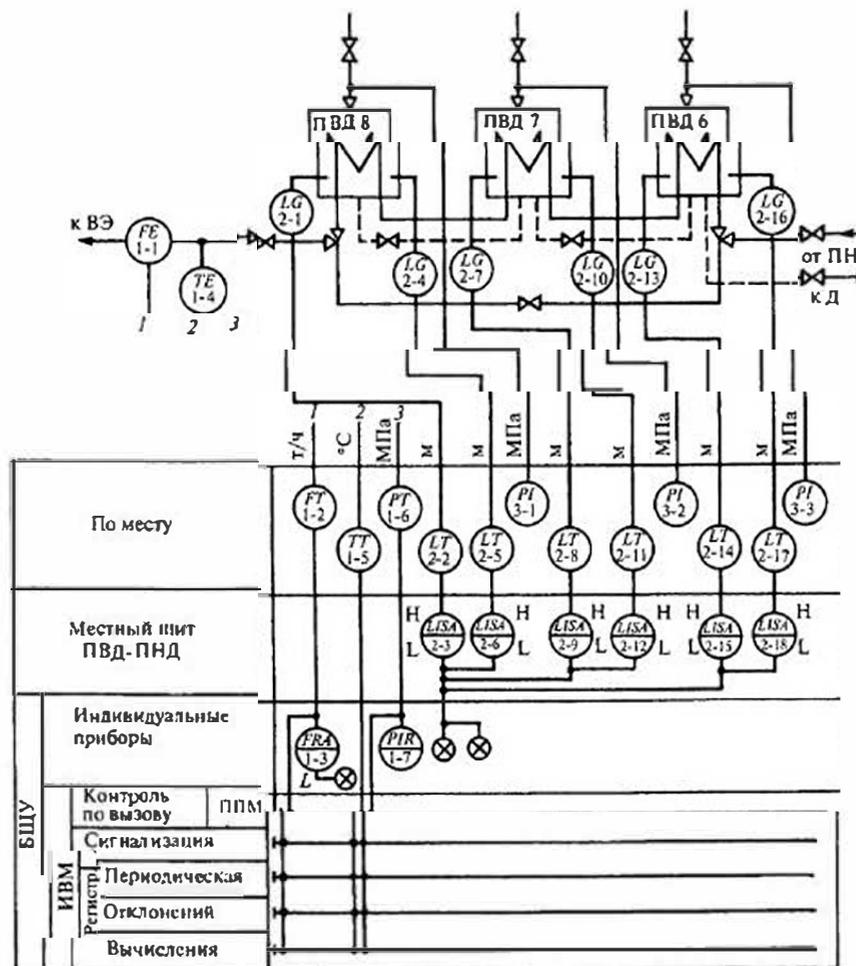


Рис. 18.4. Принципиальная схема теплотехнического контроля ПВД, выполненная в соответствии с ГОСТ 21.404-85

ставленный на рис. 18.4 объем средств теплотехнического контроля обеспечивает управление работой ПВД и контроль за их состоянием.

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 допускается разрыв линий связи, как это показано на рис. 18.4.

Первичные приборы и преобразователи, вторичные приборы обозначаются окружностями, она разделяется чертой, если приборы установлены на щите. Если приборы установлены непосредственно на объекте (по месту), то круг чертой не разделяется. В верхней части круга указывается измеряемый параметр и функции прибора (показания, запись, сигнализация), причем первая буква характеризует параметр, вторая его уточняет, а три последующие определяют выполняемые прибором функции, в нижней части круга указывается номер прибора.

Значения первых букв следующие:  $T$  — температура;  $P$  — давление;  $F$  — расход;  $L$  — уровень;  $Q$  — состав;  $D$  — плотность;  $M$  — влажность;  $R$  — радиоактивность;  $S$  — скорость, частота;  $V$  — вязкость;  $W$  — масса;  $K$  — время;  $G$  — размер, положение;  $H$  — ручное воздействие;  $U$  — несколько разнородных измеряемых величин;  $E$  — любая электрическая величина.

Вторая буква в верхней части круга может пояснять первую:  $D$  — разность, перепад;  $F$  — соотношение, доля;  $J$  — автоматическое переключение;  $Q$  — суммирование по времени. Уточняющая буква может отсутствовать. Остальные буквы в верхней части круга характеризуют функции прибора:  $E$  — первичное преобразование;  $T$  — дистанционная передача;  $Y$  — преобразование, вычислительные функции;  $I$  — показание;  $R$  — регистрация;  $A$  — сигнализация;  $C$  — регулирование;  $S$  — переключение, включение, отключение. Если прибор выполняет несколько функций, то его можно обозначать несколькими примыкающими окружностями.

Буквы, стоящие справа вне круга могут пояснять измеряемую величину или преобразование, указать границу срабатывания сигнализации или защиты. Так, поясняющие  $Q$  буквы  $pH$  и  $\infty$  обозначают соответственно анализатор  $pH$  и электрической проводимости. При расшифровке  $Y$  буквы  $E/E$ ,  $E/P$  обозначают преобразование электрического сигнала в электрический и пневматический. Буквы  $A$ ,  $S$  могут поясняться буквами  $H$  и  $L$ , характеризующие срабатывание

Таблица 18.1

Условные обозначения по ГОСТ 21.404-85	
Обозначение	Наименование
	Первичный преобразователь расхода (сужающее устройство)
	Установленный по месту передающий преобразователь расхода в электрический сигнал (дифманометр)
	Установленный на щите прибор для измерения расхода, самопишущий, сигнализирующий
	Установленный в объекте термопреобразователь (сопротивления)
	Передающий преобразователь температуры, установленный на щите (нормирующий преобразователь)
	Установленный на объекте (по месту) показывающий манометр
	Первичный преобразователь для измерения состава продукта (электродная система pH-метра)
	Установленный на щите показывающий, сигнализирующий уровнемер, входящий в систему защиты. Сигнализируются отклонения вверх и вниз от заданных значений
	Установленный по месту уравнительный сосуд

сигнализации или защиты при достижении измеряемой величиной предельного значения верхнего или нижнего.

В нижней части круга наносится цифровое или буквенно-цифровое позиционное обозначение прибора, для которого в спецификации дается тип средства измерения и его характеристика. В соответствии с ГОСТ 21.404-85 в табл. 18.1 в качестве примера приведены некоторые условные обозначения устройств теплотехнического контроля, в том числе необходимые для прочтения схемы теплотехнического контроля ПВД, приведенной на рис. 18.4. Для изображения схем теплотехнического контроля может быть использовано другое начертание, когда условные изображения измерительных приборов наносятся на функциональную схему, а не на отдельные поля в нижней части чертежа.

### 18.5. Измерительные системы теплотехнических исследований

Большинство тепловых объектов, таких как котлы, реакторы, турбины, парогенераторы и прочие, 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 [48].

Учитывая большой объем поступающей с объектов информации, испытания проводятся с использованием автоматизированной системы, включающей ЭВМ. Такие системы применяются при проведении научных исследований (АСНИ) в том числе теплофизических. Использование ЭВМ позволяет осуществить обработку опытных данных по мере их поступления, что повышает качество проведения испытаний, минимизирует временные затраты. Комплекс решаемых при автоматизации испытаний задач, связанных с определением структуры и набора технических средств вычислительного комплекса, его стыковкой с испытуемым оборудованием или установкой, использованием существующего и разработкой необходимого программного обеспечения составляет предмет дисциплины «Автоматизация научного эксперимента» [49, 50].

Вопросам экспериментального исследования характеристик технологических объектов уделяется большое внимание, вызванное 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 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  $X_j$ , 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) подлжет только периодическому лабораторному контролю.

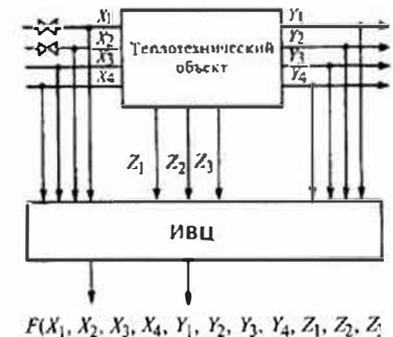


Рис. 18.5. Структурная схема системы теплотехнических исследований

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, содержание и пр. Величины  $Z_j$  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  $F(X_1, X_2, X_3, X_4, Z_1, Z_2, Z_3, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4)$  представляет собой записанные в аналитической или графической форме соотношения между заданными входными регулирующими  $X_1, X_2$  и нерегулируемыми  $X_3, X_4$ , 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  $f(X_i, Z_{ij}, Y_j)$ , которые зависят от перечисленных величин. Целевые 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 в целях определения КПД брутто по прямому балансу (18.1), (18.2) для измерения разности давлений на сужающих устройствах могут использоваться дифференциальные манометры повышенной точности, специальными термоэлектрическими преобразователями могут измеряться температуры перегретого и вторичного пара. При исследовании режимов топочного процесса с помощью оптических пирометров или специальных термоэлектрических преобразователей 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 информации 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 нестационарностью 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 стандартных программ для 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:

$$\begin{aligned} F_1(X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1m}, Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1l}, Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1m}) &= 0; \\ F_2(X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n}, Z_{21}, Z_{22}, \dots, Z_{2l}, Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2m}) &= 0; \\ &\vdots \\ F_r(X_{r1}, X_{r2}, \dots, X_{rn}, Z_{r1}, Z_{r2}, \dots, Z_{rl}, Y_{r1}, Y_{r2}, \dots, Y_{rm}) &= 0. \end{aligned} \quad (18.3)$$

Поскольку погрешность средств измерения обычно мала по сравнению с измеряемой величиной, то 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:

$$\sum_{i=1}^n (\partial F_1 / X_i) \Delta X_i + \sum_{u=1}^l (\partial F_1 / Z_u) \Delta Z_u + \sum_{j=1}^m (\partial F_1 / Y_j) \Delta Y_j = 0, \quad (18.4)$$

$$\sum_{i=1}^n (\partial F_r / X_i) \Delta X_i + \sum_{u=1}^l (\partial F_r / Z_u) \Delta Z_u + \sum_{j=1}^m (\partial F_r / Y_j) \Delta Y_j = 0.$$

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 в гл. 2.

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  $X_j$ , то 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  $X_j$ . При обработке экспериментальных данных на ЭВМ по стандартным программам рассчитываются оценки коэффициентов уравнения регрессии  $a_0, a_i, a_{ji}, a_{ii}$ , проверяется уровень их значимости и производится проверка адекватности модели полученным результатам исследования. Влияние погрешности измерения переменных  $X_j$  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.

### Контрольные вопросы

1. Какие элементы включает измерительный канал информационной системы?
2. Назовите два метода расчета метрологических характеристик измерительного канала.
3. Какие функции выполняет системный модуль в ПТК «Квинт»?
4. Как обозначаются первичные преобразователи, установленные по месту, на схемах технологического контроля?
5. Какие существуют два способа начертания схем технологического контроля?
6. Как организуется проведение испытаний технологического оборудования?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16273-70. ГСИ. Метрология. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1989.
2. Кузнецов В.А., Ялунин Г.В. Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1995.
3. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1985.
4. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1984.
5. ГОСТ 8.011-72. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений. М.: Изд-во стандартов, 1972.
6. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов измерений. М.: Изд-во стандартов, 1976.
7. Долгинский Е.Д. Обработка результатов измерений. М.: Изд-во стандартов, 1973.
8. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Венцель Е.С. Теория вероятностей. — 7-е изд. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.
10. ГОСТ 8.401-80. Классы точности средств измерений. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1980.
11. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978.
12. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. — 3-е изд. М.: Энергия, 1978. 702 с.
13. Гордов А.Н. Основы пирометрии. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
14. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992.
15. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. — 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985. 324 с.
16. Линевег Ф. Измерение температур в технике: Справочник: Пер. с нем. М.: Металлургия, 1980. 544 с.
17. Электрические измерения неэлектрических величин. — 5-е изд. / А.М. Турчин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина и др. Л.: Энергия, 1975. 576 с.
18. Лысков Б.В., Прозоров В.К. Реакторная термометрия. М.: Атомиздат, 1980. 199 с.
19. Электротехника и электроника. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. М.: Энергоатомиздат, 1998. 432 с.
20. Лачин В.И., Савельев Н.С. Электроника. Ростов-на-Дону: Изд-во Феникс, 2000. 446 с.
21. Гонек Н.Ф. Манометры. Л.: Машиностроение, 1979. 174 с.
22. Монтаж приборов и средств автоматизации / Под ред. А.К. Адабабяна и др. М.: Энергия, 1972. 503 с.
23. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. — 2-е изд. Л.: Машиностроение, 1989. 775 с.
24. ГОСТ 8.563.1-97. Измерение расходов и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. М.: Изд-во Стандартов, 1998. 276 с.

25. Бобровников Г.Н., Катков А.Г. Методы измерения уровня. Машиностроение, 1977. 165 с.
26. Павленко В.А. Газоанализаторы. Л.: Машиностроение, 1965. 296 с.
27. Авдеева А.А., Белосельский Б.С., Краснов М.Н. Контроль топлива на электростанциях. М.: Энергия, 1973. 384 с.
28. Приборы контроля окружающей среды / Под ред. В.Е. Маноилова. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
29. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей. М.: Энергия, 1970. 552 с.
30. Тхоржевский В.П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. М.: Химия, 1976. 272 с.
31. Лопатин Б.А. Теоретические основы электрических методов анализа. М.: Высш. шк., 1976. 295 с.
32. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1974. 462 с.
33. Авдеева А.А. Хроматография в энергетике. М.: Энергия, 1980. 264 с.
34. Яшин Я.И. Физико-химические основы хроматографического разделения. М.: Химия, 1976. 215 с.
35. Джефферс П., Киплинг П. Анализ газов методами газовой хроматографии. М.: Мир, 1976. 256 с.
36. Кулаков М.В., Шпатов Е.Ф., Ханберг В.А. Газовые хроматографы. М.: Энергия, 1968. 128 с.
37. Химический контроль на тепловых и атомных электростанциях / Под ред. О.И. Мартыновой. М.: Энергия, 1980. 320 с.
38. Живилова Л.М., Назаренко П.Н., Маркин Г.Н. Автоматический контроль водно-химического режима ТЭС. М.: Энергия, 1979. 224 с.
39. Кантере В.М., Казаков А.В., Кулаков М.В. Потенциометрические и титрометрические приборы. М.: Машиностроение, 1970. 304 с.
40. Стефани Е.П. Основы построения АСУ ТП. М.: Энергоиздат, 1982. 352 с.
41. Плетнев Г.П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций. М.: Издательство МЭИ, 1995. 320 с.
42. Автоматизации крупных тепловых электростанций / Под ред. М.П. Шальмана. М.: Энергия, 1974. 240 с.
43. Шальман М.П., Плютницкий В.И. Контроль и управление на атомных электростанциях. М.: Энергия, 1979. 271 с.
44. Программно-технический комплекс «Квинт» / Н.М. Курносоев и др. // Теплоэнергетика. 1993. № 10. С. 2.
45. АСУ ТП теплофикационного энергоблока на базе ПТК «Квинт» / Н.И. Давыдов и др. // Теплоэнергетика. 1996. № 10. С. 2.
46. Каган Б.М., Волтелев А.И., Лукьянов Л.М. Системы связи УВМ с объектами управления в АСУ ТП. М.: Сов. радио, 1978. 303 с.
47. Ключев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. М.: Энергия, 1980. 512 с.
48. Трёмбля В.И., Фигиер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. М.: Энергия, 1977. 297 с.
49. Бошняк Л.П. Измерения при теплотехнических исследованиях. Л.: Машиностроение, 1974. 447 с.
50. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Т. 2: Справочник. Теплотехника и теплотехника. М.: Издательство МЭИ, 2001. 562 с.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### Анализаторы

- колориметрические 410
- кондуктометрические 384
- пламенно-фотометрические 414
- полярографические 366
- потенциометрические 396
- оптические 410

### Барометры 177

### Вакуумметры 170

### Вариация 25

### Влияющая величина 25

### Водородомеры 419

### Газоанализаторы

- амперметрические 364
- инфракрасного поглощения 359
- кулонометрические 367
- магнитные 354
- объемные химические 345
- оптические 358
- тепловые 348
- термохимические 352
- ультрафиолетового поглощения 361
- фотоколориметрические 362
- хроматографические 368
- электрические 364
- Градуировочная характеристика 24

### Давление

- абсолютное 170
- вакуумметрическое 170
- избыточное 170

### Детекторы хроматографов

- аргонный ионизационный 375
- пламенно-ионизационный 375
- по теплопроводности 374

### Диафрагма

- нестандартная 263
- сдвоенная 290
- сегментная 290
- стандартная 262

### Дифманометры

- колокольные 192
- мембранные 191
- сильфонные 185
- Доверительный интервал 23
- Дозаторы хроматографические 374

### Жесткометры 413

### Зонд трубчатый 420

- шелевой 420

### Измерение температур:

- — стали 90
- — твэлов 84
- — теплоносителя 85

### Измерения косвенные 9

- лабораторные 30
- прямые 9
- совокупные 10
- совместные 10
- технические 28

### Измерительный прибор

- — аналоговый 11
- — цифровой 11
- Интервал доверительный 23
- толерантный 22
- Иономеры 409

### Кислородомеры:

- амперметрические 366
- магнитные 354
- Класс точности 26
- Колонки разделительные 372
- Кондуктометры:
  - бесэлектродные высокочастотные 393
  - — низкочастотные 394
  - электродные 388
- Коэффициент:
  - истечения 265
  - расхода 265

Континент:

- скорости входа 265
- преобразования 25

Кремнемеры 411

Кривые поляризации 365

Логометры 107

Манометры:

- двухтрубные 173
- деформационные 179
- ионизационные 208
- мембранные 186
- однострунные 175
- пьезоэлектрические 199
- сильфонные 185
- с тензопреобразователями 200
- тепловые 209
- трубчато-пружинные 182

Метод измерений 10

- оценки непосредственный 10
- — дифференциальный 10
- — компенсационный (нулевой) 11

Методика использования сужающих устройств 280

Милливольтметры:

- измерение термоЭДС 116
- устройство 116

Напоромеры 170

Неуравновешенные мосты 105

Нефелометры 416

Номинальная статическая характеристика 24

Нормальный закон распределения 20

Передача дистанционная 12

Пирометры:

- квазимонохроматические 151
- оптические 152
- полного излучения 157
- спектрального отношения 162

Погрешность:

- абсолютная 17
- аддитивная 19
- грубая 18
- дополнительная 26
- метода измерения 18

Погрешность:

- мультипликативная 19
- основная 26
- относительная 17
- приведенная 17
- систематическая 18
- случайная 18
- средства измерения 18

Поправка 18

Порог чувствительности 25

Потенциометры автоматические 119

Преобразователь:

- дифференциально-трансформаторный 187
- емкостной 207
- емкостной для измерения уровня 234
- индуктивный для измерения уровня 241
- измерительный 11
- первичный 12
- с компенсацией магнитных потоков 192
- электросиловой 198

Преобразователи термоэлектрические:

- градуировки (НСХ) 62
- кабельные 70
- правила подключения 72
- пределы допускаемых погрешностей 64
- устройство 68

Прибор измерительный 11

- показывающий 11
- регистрирующий 11
- аналоговый 11
- цифровой 11

Протоколы:

- HART 147
- RS-232, RS-485 147

Разделитель мембранный 215

Раствор буферный 409

Расходомеры:

- вихревые 317
- камерные 304
- массовые 321

Расходомеры:

- переменной перепада давления 262
- постоянного перепада давлений 293
- тахометрические 297

Расходомеры:

- турбинные 298
- ультразвуковые 312

Расходомеры шариковые 302

- электромагнитные 305

Ротаметры 293

Сенсор 12

Сигнализаторы:

- давления 183
- уровня жидких металлов 242
- сыпучих тел 258

Сосуды:

- конденсационные уравнительные 286
- разделительные 286
- уравнительные 223
- — двухкамерные 225
- — комбинированные 226
- — однокамерные 223

Среднее квадратическое отклонение 20

Средство измерений 10

Схемы измерения уровня:

- — в конденсаторе турбины 228
- — в подогревателях 228
- — — низкокипящих сред 230
- — — с двухкамерным уравнительным сосудом 225
- — — с комбинированным уравнительным сосудом 226
- — с однокамерным уравнительным сосудом 223

Счетчики количества жидкости 297

Тензопреобразователи 200

Теплосчетчики 322

Термометры манометрические:

- — газовые 42
- — жидкостные 44
- — конденсационные 43
- — стеклянные: 39
- — с вложенной шкалой 39

Термометры стеклянные:

- — палочные 39
- — поправка на выступающий столбик 40
- — назначение 40

Термопреобразователи сопротивления:

- — градуировки НСХ 50
- — медные 53

Термопреобразователи сопротивления никелевые 50

- — платиновые 52
- — подключение двухпроводное 56
- — — трехпроводное 56
- — — четырехпроводное 56
- — с согласованными характеристиками 57
- — устройство 53

Точка изопотенциальная 404

Тубидиметры 414

Тягомеры 170

Удлиняющие термоэлектродные провода 66

Уравнение расхода:

- — газа, пара 266
- — несжимаемой жидкости 265

Уравновешенные мосты 97

Уровнемер:

- акустический 249
- буйковый 232
- гидростатический 220
- дифманометрический 221
- емкостной 234
- индуктивный 241
- поплавковый 231
- радиоволновой 245
- с визуальным отсчетом 219
- сыпучих материалов 255
- термокондуктометрический 253

Устройства сужающие стандартные:

- диафрагмы 263
- сопло 263
- сопло Вентури 264

Устройство подготовки пробы 421

## Фотокolorиметры 410

## Характеристики средств измерений:

- вариация 25
- влияющая физическая величина 25
- входной сигнал 25
- выходной сигнал 25
- градуировочная характеристика 24
- дополнительная погрешность 26
- класс точности 26
- коэффициент преобразования 25
- нормальные условия применения 25
- основная погрешность 26
- порог чувствительности 25

## Характеристик средств измерений:

- чувствительность 25
- Хроматограмма 370
- Хроматографы:
  - лабораторные 376
  - промышленные 376

## Цифровой измерительный прибор 132

## Чувствительный элемент 12

## Электроды:

- водородный 399
- рабочий стеклянный 399
- сравнения 401

## САЙТЫ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫХ ФИРМ

ЗАО НПФ «Автоматика» г. Владимир <a href="http://www.avtomatika-vl.ru">www.avtomatika-vl.ru</a>	(t, p, q1, r)	НПП «СЕНСОР» Пензенская обл. <a href="http://prosensor.narod.ru">http://prosensor.narod.ru</a>	(com)
ЗАО «Альбатрос» г. Москва <a href="http://www.albatros.ru">www.albatros.ru</a>	(t, l, c)	НПП «Сенсорика» г. Екатеринбург <a href="http://sensorika.da">http://sensorika.da</a>	(q1)
НПП «Биологические системы и сенсоры» г. Москва <a href="http://www.AlfabASSENS.ru">www.AlfabASSENS.ru</a>	(qg1)	ТБН энергосервис г. Москва <a href="http://www.tbngroup.com">www.tbngroup.com</a>	(f, tt)
Фирма «Вэлст» г. Санкт-Петербург <a href="http://www.vzlst.ru">www.vzlst.ru</a>	(f, l, tt)	ЗАО «НПО Тепловизор» г. Москва <a href="http://www.lvizor.ru">www.lvizor.ru</a>	(f, tt)
Фирма «Взор» г. Нижний Новгород <a href="http://www.vzor.nnoy.ru">www.vzor.nnoy.ru</a>	(q1)	ЗАО «Теплоком» г. Санкт-Петербург <a href="http://www.teplocom.spb.ru">www.teplocom.spb.ru</a>	(f, tt)
ФГУП «ВНИИА» г. Москва <a href="http://www.vniia.ru">www.vniia.ru</a>	(p)	АООТ «Теплоприбор» г. Рязань <a href="http://www.teplopribor.ru">www.teplopribor.ru</a>	(p, l, f, tt)
З-д «Водоприбор» г. Москва <a href="http://www.mtu-nel.ru">www.mtu-nel.ru</a>	(f, tt)	ОАО «Теплоприбор» г. Челябинск <a href="http://www.tpchel.ru">www.tpchel.ru</a>	(t, l, r)
Фирма «Диспр» г. Москва <a href="http://www.dncpr-7.ru">www.dncpr-7.ru</a>	(f)	АО «Термик» г. Москва <a href="http://www.termik.ru">www.termik.ru</a>	(t)
ОАО «Завод электроники и механики» г. Чебоксары <a href="http://www.zem.ru">www.zem.ru</a>	(f, tt)	ЗАО «Термоавтоматика» г. Москва <a href="http://www.termoavtomatika.ru">www.termoavtomatika.ru</a>	(t, p)
АО НПФ «Логика» г. Санкт-Петербург <a href="http://www.logika.spb.ru">www.logika.spb.ru</a>	(tt)	ОАО «Термоприбор» г. Клин Моск. обл. <a href="http://www.termopribor.ru">www.termopribor.ru</a>	(t)
З-д «Манометр» г. Москва <a href="http://www.manometr.com">www.manometr.com</a>	(p)	НПП «Техноприбор» г. Москва <a href="http://www.techpribor.ru">www.techpribor.ru</a>	(q1)
ОАО «Манотомь» г. Томск <a href="http://www.manotom.tomsk.ru">www.manotom.tomsk.ru</a>	(p)	НПП «ТЭМ-прибор» г. Москва <a href="http://www.tem-pribor.com">www.tem-pribor.com</a>	(f, tt)
Концерн «Метран» г. Челябинск <a href="http://www.metran.ru">www.metran.ru</a>	(com)	ООО «Урал семикондактор» г. Екатеринбург <a href="http://home.ural.ru/~usc">http://home.ural.ru/~usc</a>	(q1)
З-д «Молния» г. Москва <a href="http://www.molnija.ru">www.molnija.ru</a>	(f, tt)	ОАО «Хроматограф» г. Москва <a href="http://www.chrom.ru">www.chrom.ru</a>	(qb)
ЗАО «Мытищин-Камstrup» Моск. обл. <a href="http://www.kamstrup.com">www.kamstrup.com</a>	(f, tt)	СКБ «ХРОМАТЭК» г. Йошкар-Ола <a href="http://www.chromatec.mari.ru">www.chromatec.mari.ru</a>	(qg)
НПП «Навигатор» г. Москва <a href="http://www.navigator-t.ru">www.navigator-t.ru</a>	(t)	НПП «Эколикс» г. Москва <a href="http://www.ecolix.com">www.ecolix.com</a>	(q1)
ЗАО «НВТ-Автоматика» г. Москва <a href="http://www.nvt.msk.ru">www.nvt.msk.ru</a>	(c)	НПП «Элсмер» Моск. обл. <a href="http://www.elemer.ru">www.elemer.ru</a>	(t, tt, r)
ЗАО «ОРЛЭКС» г. Орел <a href="http://www.valley.ru/~orlex">www.valley.ru/~orlex</a>	(p)	ООО «ЭЛЬСТЕР Рус Газ Прибор» г. Арзамас <a href="http://www.gaslectro.ru">www.gaslectro.ru</a>	(f)
ООО СКБ «Приборы и системы» г. Рязань <a href="http://www.skb.ryazan.ru">www.skb.ryazan.ru</a>	(com)	ЗАО «ЭНЕРГОТЕСТ ВТИ» г. Москва <a href="http://www.enrgotest.ru">www.enrgotest.ru</a>	(q1)
АОО «Саяны» г. Москва <a href="http://www.sayany.ru">www.sayany.ru</a>	(t, f, tt)	НПО «ЮМАС» г. Москва <a href="http://www.jumas.ru">www.jumas.ru</a>	(p, t)
Фирма АВВ <a href="http://www.abb.ru/menopica">www.abb.ru/menopica</a>	(f, tt, c)	Фирма «Prominent GmbH» <a href="http://www.prominent.de">www.prominent.de</a>	(q1)

З-д «ASWEGA» г. Таллинн, Эстония <a href="http://www.aswegam.ru">www.aswegam.ru</a>	(f, it)	Фирма Riken Keiki <a href="http://www.rikenkeiki.co.jp">www.rikenkeiki.co.jp</a>	(qg)
Фирма Fisher-Rosemount <a href="http://www.fisher-rosesmount.ru">www.fisher-rosesmount.ru</a>	(com)	Фирма Siemens <a href="http://www.fielddevices.com">www.fielddevices.com</a>	(com)
Фирма Foxboro <a href="http://www.foxboro.com">www.foxboro.com</a>	(com)	Фирма Strumen г. Минск Беларусь <a href="http://www.strumen.com">www.strumen.com</a>	(f, it)
Фирма HANNA Instruments <a href="http://www.scoinstroms.ru">www.scoinstroms.ru</a>	(qj)	Фирма Swan Analitische instrument <a href="http://www.swan.ch">www.swan.ch</a>	(qj)
Фирма Honeywell <a href="http://www.iac.honeywell.com">www.iac.honeywell.com</a>	(com)	Фирма VALCOM <a href="http://www.valcom.ru">www.valcom.ru</a>	(com)
Фирма Yokogawa <a href="http://www.yokogawa.ru">www.yokogawa.ru</a>	(com)	Фирма VEGA <a href="http://www.vega-g.de">www.vega-g.de</a>	(i)
Фирма Jumo <a href="http://www.jumo.ru">www.jumo.ru</a>	(com)	Фирма Wika <a href="http://www.wika.ru">www.wika.ru</a>	(t, p)
Фирма Micro Motion <a href="http://www.micromotion.com">www.micromotion.com</a>	(f)		

Выпускаемые фирмами средства измерения:  $t$  — температуры,  $p$  — давления,  $f$  — расхода,  $l$  — уровня,  $qg$  — состава газа,  $qj$  — состава жидкостей,  $m$  — влажности,  $h$  — теплоты,  $c$  — системы управления,  $r$  — вторичные устройства,  $com$  — комплекс средств измерения различных величин как первичных, так и вторичных, включая системы управления,  $dil$  — поставка приборов других фирм.

Учебное издание

Иванова Галина Михайловна, Кузнецов Николай Дмитриевич,  
Чистяков Владимир Сергеевич

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Учебник для студентов вузов

Редактор *О.М. Горина*  
Художественный редактор *А.Ю. Землеруб*  
Технический редактор *Т.Н. Дворецкова*  
Корректор *В.В. Сомова*  
Компьютерная верстка *В.В. Пак*

Подписано в печать с оригинала-макета 21.11.05. Формат 60×90/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 28,75. Уч.-изд. л. 27,8.  
Тираж 5000 экз. (2-й завод 1001—2500) Заказ 176т С-011.

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14.  
Отпечатано в типографии НИИ «Геодезия», 141292, Моск. обл., г. Красноармейск,  
пр-т Испытателей, д. 14.