МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ-ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

А.Н. Токарева, М.С. Демченко, А.П. Мартынов

ПРИБОРЫ ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

Зерноград – 2025

© Токарева А.Н.,
Демченко М.С., Мартынов А.П., 2025
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

Об издании – 1, 2
Содержание

УДК 62-791

Издается по решению методического совета энергетического факультета Азово-Черноморского инженерного института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донской государственный аграрный университет» в г. Зерограде

Рецензенты:
Кандидат технических наук, доцент ***Лебедев К.Н.***
Кандидат технических наук, доцент ***Степанчук Г.В.***

Токарева А.Н. Приборы для теплотехнических измерений. [Электронный ресурс]: Учебное пособие/ А.Н. Токарева, М.С. Демченко, А.П. Мартынов. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025. – 98 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

В учебном пособии рассмотрены принципы действия и особенности устройства современных средств измерения температуры, давления, количества и расхода жидкостей и газов, определения характеристик газовой среды.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 35.03.06 «Агроинженерия".

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры электроэнергетики и теплотехники
Протокол № 5 от 26.12.2024г.

Рассмотрено и одобрено методической комиссией энергетической факультета
Протокол № 3 от 25.02.2025г.

© Токарева А.Н., Демченко М.С., Мартынов А.П., 2025
© Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2025

Содержание

Раздел 1. Лабораторные работы…… 4

Лабораторная работа №1. Изучение приборов для измерения давления…… 4

Лабораторная работа №2. Изучение приборов для теплового контроля…….. 22

Лабораторная работа №3. Изучение приборов для измерения количества и расхода жидкостей и газов……. 48

Лабораторная работа №4. Изучение приборов для определения характеристик газовой среды …… 70

Лабораторная работа №5 Измерение температуры электрическими методами…….. 82

Раздел 2. Техника безопасности…… 92

Раздел 3. Форма и содержание отчета по работе……. 92

Список литературы……. 93

Раздел 1. Лабораторные работы

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы – ознакомиться с классификацией, классами точности и принципами действия приборов для измерения давления. Снять показания с приборов и произвести пересчет показаний в различные системы единиц.

Продолжительность занятия: 2 часа.

Оборудование, приборы, инструменты: барометр, жидкостные стеклянные чашечные манометры, U-образные приборы, деформационные пружинно-трубчатые приборы и их разрезы, сильфоны, демонстрационная установка с компрессором, ресивером, к которому подсоединены U-образная трубка и пружинно-трубчатый манометр

1. Общие сведения

Давление – физическая величина, равная отношению нормальной составляющей силы к площади, на которую действует сила. Согласно молекулярно-кинетической теории газов, давление газа рассматривается как результат ударов молекул о стенки сосуда.

При измерении давления различают: барометрическое, манометрическое, вакуумметрическое и абсолютное давления.

Барометрическое давление (B, $P_{атм}$) создается массой воздушного столба земной атмосферы.

Величина превышения давления среды над барометрическим называется манометрическим давлением ($P_д$, $P_{изб}$).

Подавляющее большинство приборов, измеряющих давление, показывают именно манометрическое давление.

В случае, если давление среды ниже барометрического, разность между ними называют вакуумметрическим давлением ($P_в$, $P_{вак}$).

Абсолютное давление (P, P_a, $P_{абс}$) среды может быть больше или меньше барометрического.

В первом случае оно определяется по формуле

$$P = B + P_M, \quad (1.1)$$

а во втором случае

$$P = B - P_B. \quad (1.2)$$

В системе СИ единицей измерения давления является паскаль, Па, определяемый как отношение Н/м^2. В практике технических измерений часто применяют более удобные для конкретного типа измерений единицы, в том числе внесистемные, зависящие друг от друга следующим образом:

1 ат = 0,97 атм = 0,98 бар = 10 м вод. ст = 735 мм рт. ст = $0{,}98 \cdot 10^{-5}$ Па. (1.3)

Погрешность расчетов по формуле (1.3) не превышает 0,5 %.

Техническая атмосфера, ат, – единица измерения, равная давлению, производимому силой в 1 кгс, равномерно распределённой по перпендикулярной к ней плоской поверхности площадью 1 см^2, 1 ат = 98 066,5 Па.

Единица измерения, называемая баром, является внесистемной и в ранее используемой системе СГС составляла 1 дин/см^2.

Метр водяного столба, м в. ст, равен гидростатическому давлению столба воды высотой 1 м и температурой 4 °С (1 м вод. ст = 9806,65 Па).

Миллиметр ртутного столба, мм рт. ст, равен гидростатическому давлению столба ртути высотой 1 мм и плотностью $\rho = 13{,}595 \cdot 10^3$ кг/м^3 при ускорении свободного падения g = 9,806 м/с^2.

В практике проведения измерений также выделяют нормальную (физическую) атмосферу, атм, равную давлению столба ртути высотой 760 мм на его горизонтальное основание при её плотности $\rho = 13{,}595 \cdot 10^3$, температуре 0 °С и ускорении свободного падения g = 9,806 м/с^2 (1 атм = 101 325 Па = 1,03 ат).

Приборы для измерения давления обобщенно называют манометрами. Существует большое разнообразие данных приборов,

основным элементом которых является измерительный преобразователь давления (датчик давления).

Приборы для измерения давления подразделяются:

– по принципу действия на жидкостные (*U*-образные, чашечные), деформационные (трубчатые, мембранные, сильфонные), электрические (резистивные, емкостные, пьезоэлектрические) и грузопоршневые;

– по виду измеряемого давления на манометры; вакуумметры; барометры; мановакуумметры; дифманометры; микроманометры; тягомеры и напоромеры;

– по области применения на общепромышленные, или технические, лабораторные, образцовые, специальные и эталонные;

– по способу отображения результатов измерения на показывающие, сигнализирующие и регистрирующие.

– по выходному сигналу преобразователя давления на аналоговые (пневматические, взаимной индуктивности, электрические) и цифровые.

2. Приборы для измерения давления

2.1. Жидкостные манометры

Жидкостные манометры подразделяются на *U*-образные и чашечные. Данные приборы отличаются относительной простотой конструкции, обеспечивающей достаточную относительную погрешность для технических и лабораторных измерений, которая обычно не превышает 1 %.

Принципиальная схема двухтрубного дифференциального U-образного манометра представлена на рис. 1.1. Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1, 2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреплена пластина с нанесенной шкалой 4. Трубки заполнены рабочей жидкостью до нулевой отметки. Трубка 1

находится под измеряемым давлением, а трубка 2 сообщается с атмосферой. При измерении разности давлений к трубкам 1, 2 подводят патрубки с измеряемыми давлениями.

В качестве рабочей жидкости может использоваться вода, ртуть, спирт, трансформаторное масло и др.

Двухтрубные манометры с водяным заполнением применяются для измерения давления, разряжения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в интервале ±10 кПа, при использовании в качестве рабочей жидкости ртути – верхний предел измерения может быть увеличен до 0,1 МПа.

Чашечные манометры (рис. 1.2) состоят из стеклянной трубки *2*, соединенной с сосудом в виде чашки *1*. В конструкции чашки имеется измерительный патрубок *4* для подключения к измеряемой среде. В связи с тем, что площадь живого сечения чашки значительно больше площади живого сечения трубки, отсчет по шкале *3* проводится только по перепаду высоты в трубке.

Погрешность измерений при этом зависит от соотношения площадей сечения трубки f_1 , м^2, и чашки f_2, м^2, и чем оно меньше, тем больше погрешность измерений. В конструкциях чашечных манометров обычно $S_1/S_2 \leq 1/400$.

Для измерения давления и разности давлений до 3 кПа, как правило, используются микроманометры. Известны различные конструкции микроманометров: дифференциальный манометр Рекнагеля, тягомер Крелля, микроманометр Фюсса и др.

Наибольшее распространение в нашей стране получили лабораторные **микроманометры** типа ММН с наклонной измерительной трубкой, принципиальная схема, которых представлена на рис. 1.3.

Показания манометра определяются высотой столбика рабочей жидкости по шкале измерительной трубки 1. Трубка имеет наклон, под углом α.

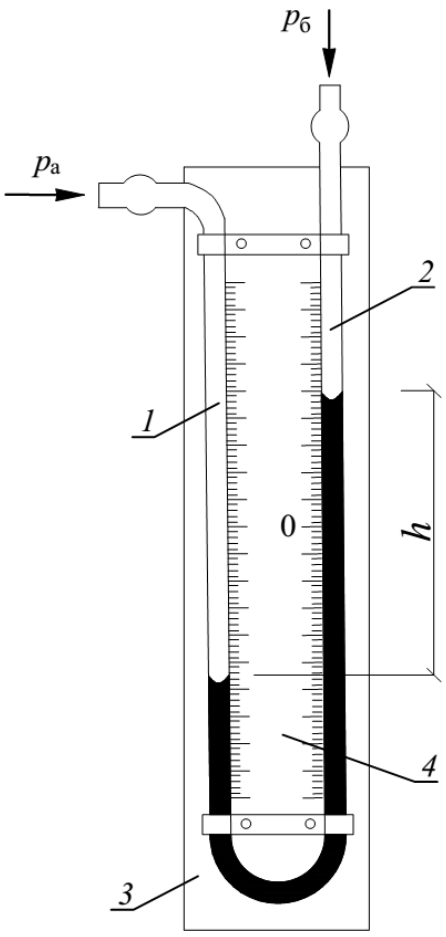


Рис. 1.1. *U*-образный манометр: *1, 2* – стеклянные трубки; *3* – основание; *4* – шкальная пластина

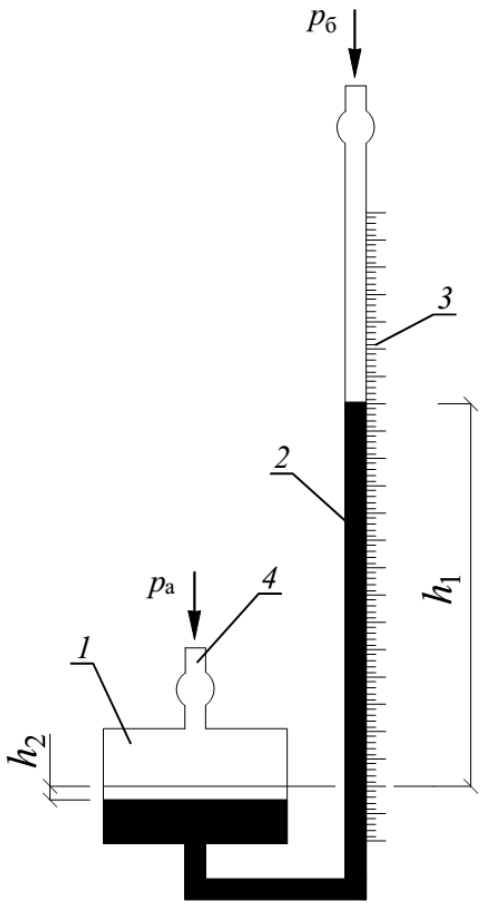


Рис. 1.2. Чашечный манометр: *1* – чашка;*2* – стеклянная трубка; *3* – шкальная пластина; *4* – измерительный патрубок

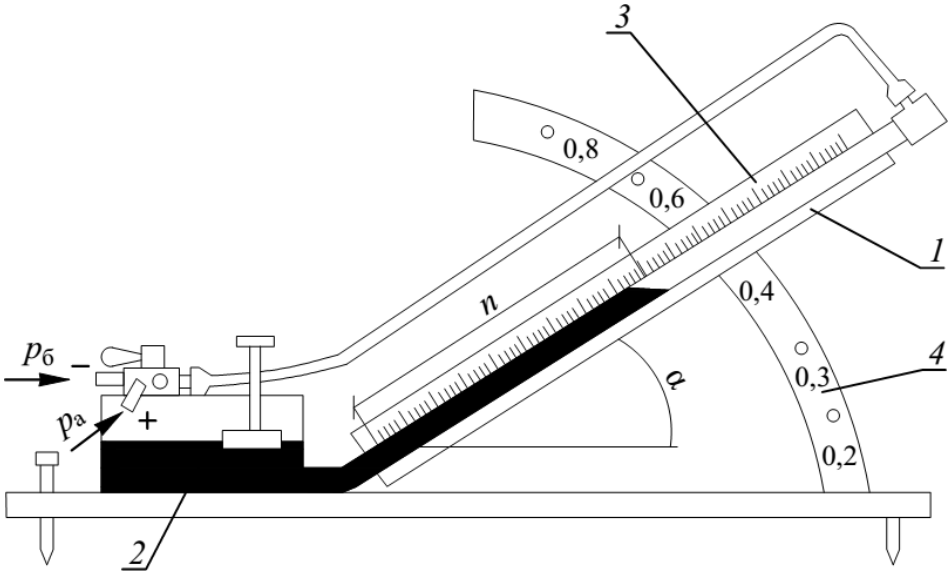


Рис. 1.3. Микроманометр многодиапазонный с наклонной трубкой: *1* – измерительная трубка; *2* – сосуд; *3* – кронштейн; *4* – сектор

2.2. Деформационные манометры

Принцип работы деформационных манометров заключается в определении деформации чувствительного элемента под действием измеряемого давления. В зависимости от конструкции чувствительного элемента деформационные манометры подразделяются на трубчатые, мембранные и сильфонные.

Внешний вид трубчатого манометра приведен на рис. 1.4.

Трубчатые манометры являются измерительными приборами прямого преобразования, в которых давление последовательно преобразуется в перемещение чувствительного элемента и связанного с ним механически показывающего, регистрирующего или контактного устройства.

Схема работы трубчатого манометра приведена на рис. 1.4 и 1.5 [35].

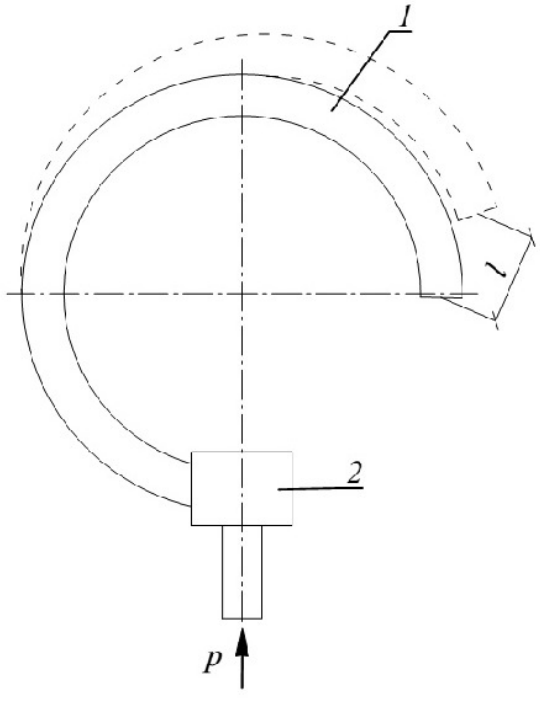


Рис. 1.4. Трубчатая пружина Бурдо
1 - трубка, 2 - держатель

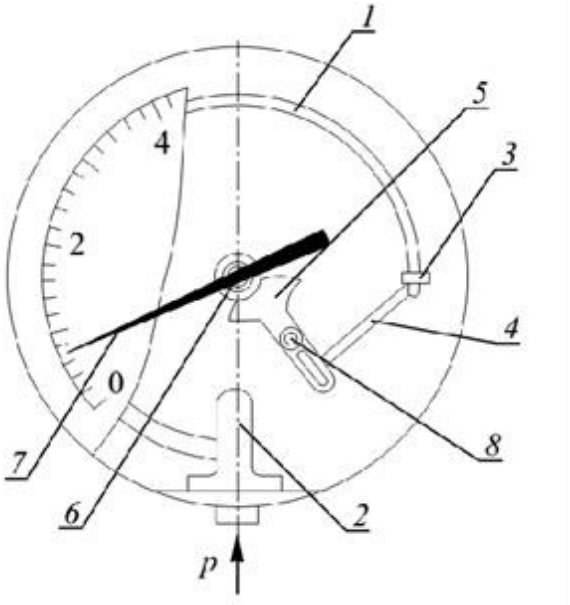


Рис. 1.5. Схема трубчатого манометра
1 – трубчатая пружина, 2 – держатель, 3 – пробка, 4 – поводок, 5 – зубчатый сектор, 6 – шестеренка, 7 – измерительная стрелка, 8 – ось вращения зубчатого сектора

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 присоединяется к пробке *3*, соединенной с поводком *4* шарниром. Под действием подведенного давления пружина *1* перемещается, приводя в движение поводок *4*. При перемещении свободного конца пружины поводок поворачивает зубчатый сектор *5* относительно оси *8*, поворачивая шестерню *6* и сидящую на одной оси с ней показывающую стрелку *7*, которая отображает результаты измерения давления на шкале измерительного прибора.

Современные трубчатые манометры применяются для измерения давлений до 1000 МПа. Схожий принцип работы имеют металлические барометры (анероиды), работающие аналогично барометрам Види и Бурдона, которые предназначены для изменения величины атмосферного давления

Конструкция **мембранного манометра** показана на рис. 1.6. Данные приборы имеют чувствительный элемент в виде мембраны и предназначены для измерения избыточных давлений, разрежений и перепадов давлений.

Мембрана манометра *9* представляет собой диск, помещенный в измерительный блок (фланцы *8*, *10*). Под действием давления мембрана изменяет свое положение, воздействуя на тягу *6*, которая приводит в движение зубчатый сегмент *4*, перемещающий измерительную стрелку *2*.

В зависимости от применяемого материла мембраны делятся на упругие и вялые. Упругие мембраны изготавливают из тонких металлических пластин (бронзовых, латунных, стальных), а вялые – из прорезиненных тонких тканей (капроновых, шелковых, полотняных). Мембраны, имеющие ребра жесткости, называются гофрированными, а без ребер жесткости – плоскими.

Положение мембраны находится в функциональной зависимости от измеряемого давления и определяется её формой и материалом, наличием гофр и другими факторами. Выбор конструкции диафрагмы мембранного манометра удобнее проводить опытным путем.

В зависимости от величины измеряемого давления (при малых давлениях или разрежениях) мембраны могут собираться в мембранные коробки (на сварке), а мембранные коробки – в мембранные блоки.

Схема **сильфонного манометра** изображена на рис. 1.7.

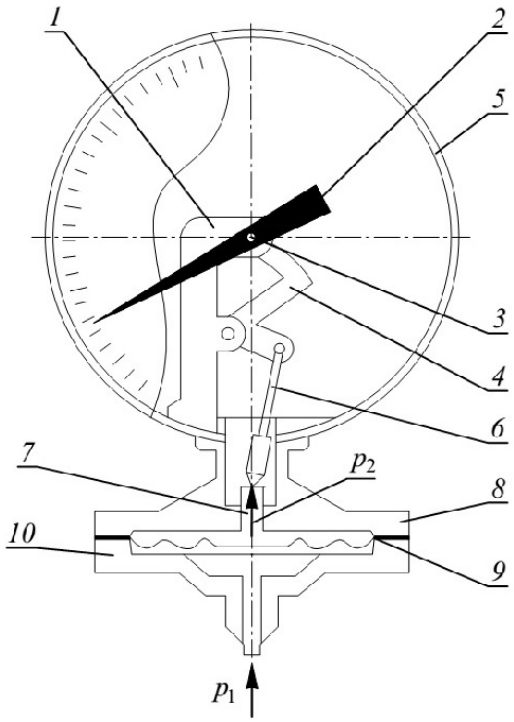


Рис. 1.6. Схема мембранного манометра
1 – стойка, 2 – измерительная стрелка, 3 – ось, 4 – зубчатый сегмент, 5 – корпус, 6 – тяга, 7 – жесткий центр, 8,10 – фланцы, 9 - мембрана

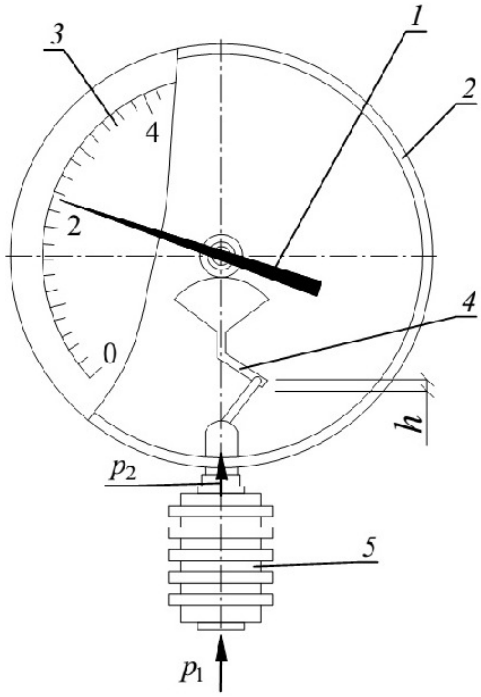


Рис. 1.7. Схема сильфонного манометра
1 – измерительная стрелка, 2 – корпус, 3 – шкала, 4 – зубчатый сектор, 5 - сильфон

Принцип работы сильфонного манометра аналогичен мембранному. Рабочим органом манометра служит сильфон, представляющий собой тонкостенную металлическую камеру с гофрированными боковыми поверхностями.

Измеряемое давление p_1 (перепад давлений $p_1 - p_2$) в приведенных манометрах зависит от величины прогиба мембраны и изменения положения сильфона, пропорциональных перемещению тяги зубчатого сегмента h (рис. 1.7).

2.3. Электрические манометры

Принцип действия электрических манометров основан на использовании зависимости измеряемого давления от электрических характеристик (активное сопротивление, емкость и др.), По типу преобразователя электрические манометры подразделяются на емкостные, пьезоэлектрические и тензорезисторные.

Емкостные манометры – это приборы, принцип действия которых заключается в определении емкости конденсатора, зависящей от величины измеряемого давления. По конструкции преобразователя давления емкостные конденсаторы подразделяются на датчики (рис. 1.8): с изменяющейся величиной зазора δ, м, между пластинами конденсатора; с изменяющейся площадью S, м^2, взаимного перекрытия пластин, зависящей от длины перекрытия l, м, и ширины пластин b, м; с изменяющейся диэлектрической проницаемостью материала между пластинами конденсатора.

Емкостные манометры имеют следующие преимущества: простота конструкции; компактность; высокая точность и стабильность показаний; высокая чувствительность. Следует отметить основные недостатки прибора: потребность в источнике напряжения высокой частоты; необходимость в усилении сигнала первичного преобразователя; большое внутреннее сопротивление; экранирование с целью снижения влияния паразитных емкостей.

Пьезоэлектрические манометры – это приборы для измерения давления, работа которых основана на свойствах кристаллических веществ

(кварц, турмалин, титанат бария и др.) создавать электрические заряды в результате механического воздействия на них. Данные приборы применяются для измерения давлений в быстропротекающих процессах, так как возникновение электрического заряда происходит мгновенно при приложении силы.

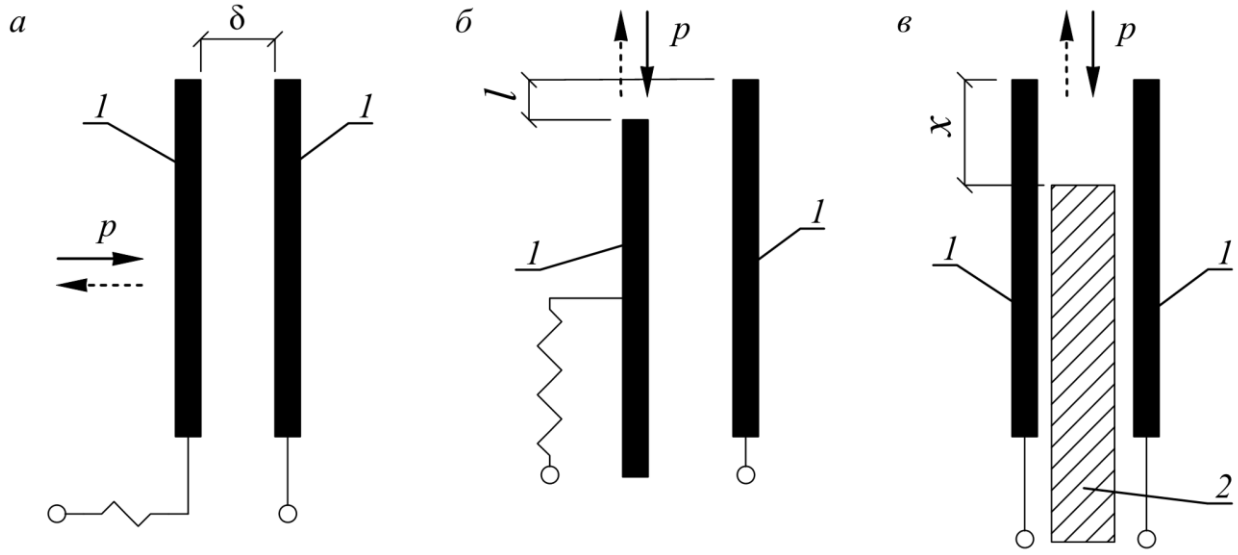


Рис. 1.8. Емкостные датчики давления (*а* – с изменяющейся величиной зазора; *б* – с изменяющейся площадью; *в* – с изменяющейся диэлектрической проницаемостью): *1* – пластины конденсатора; *2* – диэлектрик

Наиболее распространенным материалом для изготовления пьезоэлектрических датчиков является кварц, который имеет ряд конкурентных преимуществ: низкая стоимость; высокие пьезоэлектрические свойства; механическая прочность; удовлетворительные изоляционные свойства; независимость пьезоэлектрической характеристики от температуры измеряемой среды до 500 °С.

На рис. 1.9 [26] приведена схема образования электрических зарядов на гранях кварцевого кристалла, при его сжатии в определенном направлении.

В конструкции кристалла можно выделить три оси симметрии: *z* – продольная (оптическая); *x* – поперечная (электрическая) ось, проходящая через ребра призмы перпендикулярно оси *z*; *y* – поперечная (механическая, нейтральная) ось, проходящая через грани призмы перпендикулярно им и осям *z, x.*

Устройство пьезоэлектрического манометра показано на рис. 1.10.

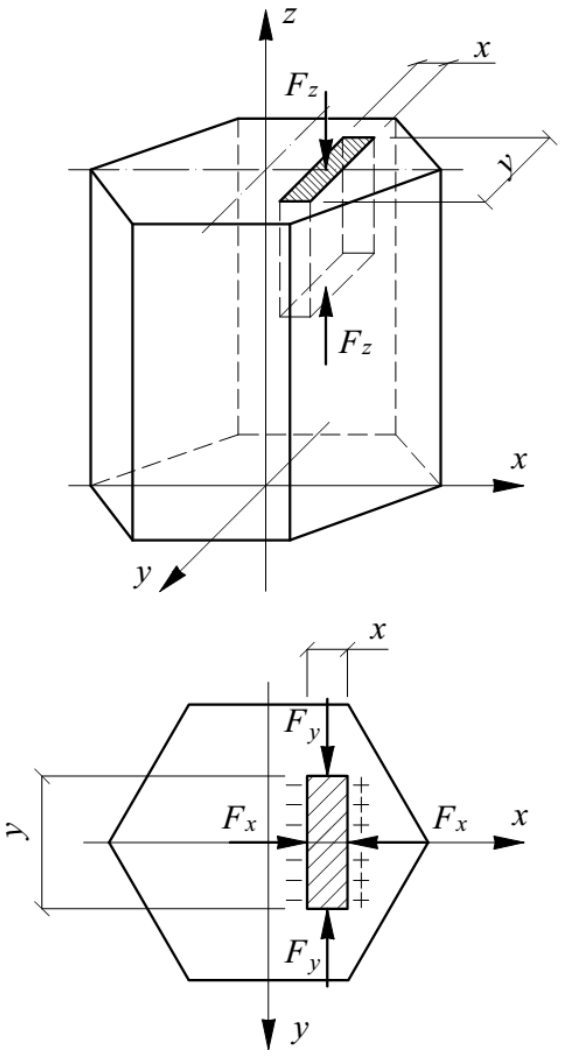


Рис. 1.9. Схема кристалла кварца

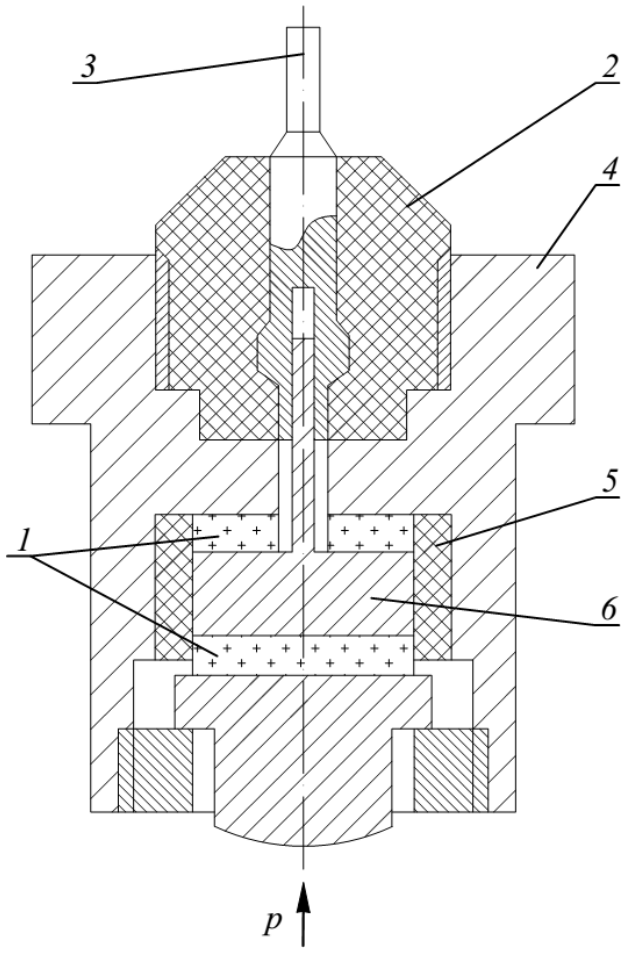


Рис. 1.10. Схема устройства пьезоэлектрического манометра: *1* – пьезопластины; 2 – гайка из диэлектрика; 3 – электрический вывод; 4 – корпус; 5 – изолятор; 6 – металлический электрод

Измеряемое давление равномерно распределяется по поверхности кварцевых пластин. Кварцевые пластины *1* крепятся между металлическими электродом *6*, который соединен с электрическим выводом *3,* проходящим через экранированную гайку *2* из диэлектрика. Кварцевые пластины обычно расположены таким образом, что в измерительную схему подается отрицательный потенциал. Положительный потенциал подается на корпус. Для уменьшения утечки зарядов применяется качественная изоляция, для достижения которой поверхность кварцевых пластин тщательно полируют.

Пьезоэлектрические манометры используются для измерения давлений до 100 МПа при температуре измеряемой среды до 500 °С в быстропротекающих процессах. Пьезоэлектрическая постоянная кварца не зависит от температуры до 500 °С, при температурах в интервале от 500 до 570 °С кварцевые кристаллы теряют пьезоэлектрические свойства, а по достижении температуры 570 °С их пьезоэлектрическая постоянная $k = 0$.

Тензорезисторные манометры – это приборы для измерения давления, принцип работы которых основан на явлении тензоэффекта, который заключается в изменении активного сопротивления R, Ом, некоторых материалов приих механической деформации.

В зависимости от способа крепления чувствительных элементов к датчику тензорезисторные манометры подразделяются на наклеиваемые и ненаклеиваемые. По конструктивному исполнению тензопреобразователя они делятся на проволочные, фольгированные и полупроводниковые [17, 43].

Проволочный тензопреобразователь, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.11, *а*, представляет собой отрезок тонкой проволоки диаметром от 0,02 до 0,05 мм, наклеенной в виде зигзага на тонкую целлофановую подложку и закрытой сверху клеевым либо лаковым составом. Активное сопротивление R проволочных тензопреобразователей составляет от 10 до 1000 Ом.

Фольгированные тензопреобразователи (рис. 1.11, *б–г*) изготавливаютсяв виде решетки из фольги толщиной от 0,004 до 0,012 мм. Они имеют большую площадь поперечного сечения проводника и большую теплоотдачу, что позволяет им пропускать больший ток по сравнению с проволочными. По форме решетки, фольгированные тензопреобразователи подразделяются на круговые, короткобазовые и типовые. Активное сопротивление составляет 30…250 Ом.

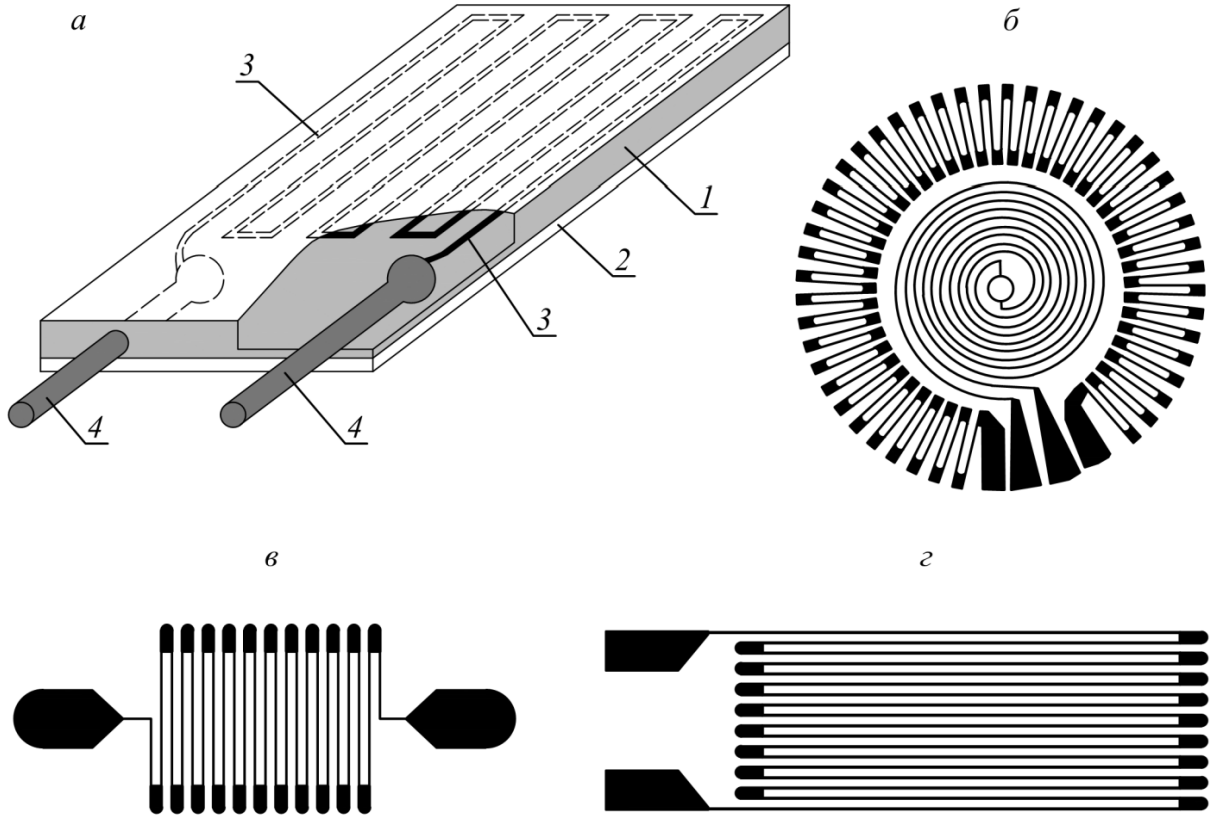


Рис.1.11. Проволочные и фольгированные тензопреобразователи: *а* – наклеиваемый проволочный тензопреобразователь (*1* – клей, либо лак; *2* – подложка из целлофана; *3* – тензочувствительная проволока; *4* – медные выводы); *б* – фольгированный круговой; *в* – то же короткобазовый; *г* – то же типовой конструкции

Основным недостатком проволочных и фольгированных тензопреобразователей является низкий диапазон рабочих температур от −40 до 70 °С.

Внешний вид чувствительного элемента полупроводникового тензопреобразователя приведен на рис. 1.12. Он состоит из сапфировой подложки *3*, на которой нанесены тензорезисторы *4*. Подложка присоединена серебросодержащим припоем *3* к титановой мембране *1*.

Чувствительный элемент является составной частью измерительного преобразователя давления (рис. 1.13 [42]).

Мембранный тензопреобразователь *3* помещен внутрь основания *9*. Внутренний канал *4* тензопреобразователя заполнен кремнийорганической жидкостью и отделен от измеряемой среды металлической гофрированный мембраной *6*, присоединенной к основанию *9*. Полость *10* сообщается с атмосферным воздухом. Измеряемое давление действует на мембрану тензопреобразователя *3*, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается в электронный блок *1* по проводам через гермовывод *2*.

Коэффициент тензочувствительности для германия и кремния имеет наибольшие значения (m = 140...175). Большой тензочувствительностью обладают полупроводниковые соединения GaSb, InSb, PbTe и пр.

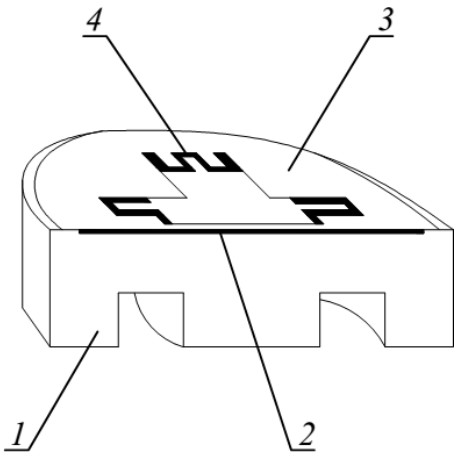


Рис.1.12. Принципиальная схема чувствительного элемента полупроводникового тензопреобразователя: *1* – титановая мембрана; *2* – серебросодержащий припой; *3* – сапфировая подложка; *4* – тензорезисторы

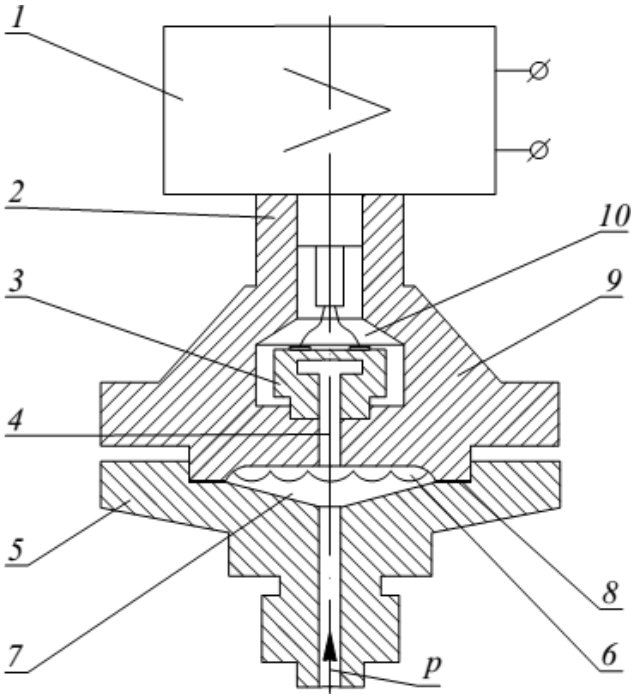


Рис. 1.13. Конструкция измерительного преобразователя: *1* – электронный блок; 2 – гермовывод; *3* – тензопреобразователь; *4* – канал; *5* – фланец; *6* – измерительная мембрана; *7* – измерительная камера; *8* – прокладка; *9* – основание; *10* – внутренняя полость.

2.4. Грузопоршневые манометры

Принцип действия грузопоршневого манометра основана на уравновешивании сил, создаваемых измеряемым давлением, и грузов, которые действуют на поршень, расположенный в цилиндре.

Схема грузопоршневого манометра приведена на рис. 1.14 [17, 43]. Манометр условно разделен на грузовую и поршневую части. Система манометра заполняется рабочей жидкостью (как правило, трансформаторным, вазелиновым или касторовым маслом) через воронку (бачок) *8*.

Грузовая часть представляет собой колонку *7* с полированным цилиндрическим каналом, в который вставляется поршень *6*. На поршень установлена тарелка *4*, на которую помещаются контрольные грузы *5*. Канал колонки подключен к горизонтальному каналу, который соединен со штуцерами *3* поверяемого и образцового манометра, бачком с рабочей жидкостью *8* и прессовой частью.

Прессовая часть состоит из цилиндра с поршнем *1*, оборудованного маховиком *9*. Поршень *1* предназначен для обеспечения погружения поршня *6* не менее чем на 2/3 своей высоты в цилиндрическую колонку *7*.

На поршень *6* действуют две противодействующие силы: сила, создаваемая давлением жидкости, и сила тяжести поршня и грузов. При равенстве этих сил поршень уравновешивается и поднимается на определенную высоту.

Площадь поперечного сечения поршня, как правило, равна 1 $см^2$, поэтому создаваемое давление равно весу поршня и груза. Масса поршня с тарелкой1 кг. Масса отдельных грузов указывается на них.

Грузопоршневые манометры предназначены для измерения давлений до 10^3 МПа и градуировки и поверки манометров других типов.

Внешний вид грузопоршневого манометра МП-600 приведен на рис. 1.15. Диапазон измерений данного манометра составляет от 1 до 60 МПа.

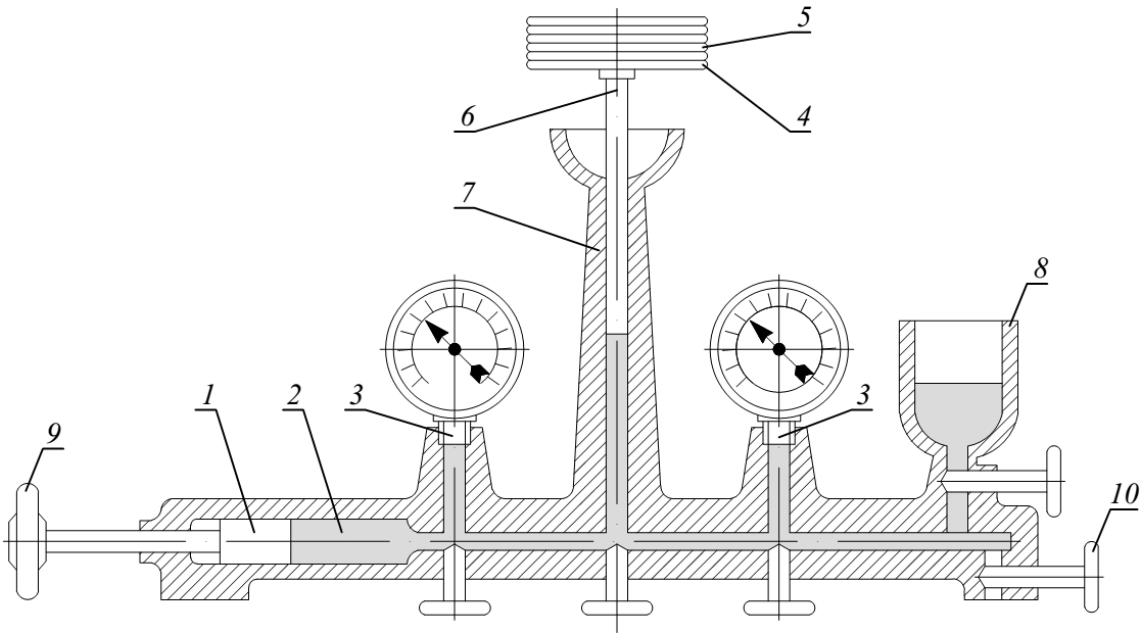


Рис. 1.14. Принципиальная схема грузопоршневого манометра: *1*, *6* – поршни; *2* – камера; *3* – штуцеры; *4* – тарелка; *5* – грузы; *7* – колонка; *8* – воронка; *9* – маховик; *10* – вентиль



Рис. 1.15. Внешний вид грузопоршневого манометра МП-600

Если для измерения давления недостаточно грузов, входящих в комплект манометра, допускается использовать дополнительные грузы, погрешность массы которых не превышает 20 % от класса точности манометра.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные единицы измерений давлений.
2. Какие виды давлений Вы знаете?
3. Физический смысл единицы измерения «паскаль» (1 Па).
4. Приведите классификацию манометров.
5. Что общего и в чем заключаются отличия между *U*-образными, чашечными и манометрами с наклонной трубкой?
6. Опишите принцип работы трубчатых, мембранных и сильфонных манометров. В чем заключается отличие конструкции чувствительных элементов данных манометров?
7. Какие конструкции емкостных датчиков давления Вы знаете?
8. Принцип работы пьезоэлектрических манометров.
9. В чем состоят отличия конструкции чувствительных элементов проволочных, фольгированных и полупроводниковых тензопреобразователей?
10. Опишите схему образования электрических зарядов на гранях кварцевого кристалла при его сжатии в определенном направлении.
11. По какой зависимости определяется коэффициент тензочувствительности тензопреобразователя по сопротивлению?
12. На каком принципе основана работа грузопоршневых манометров?
13. Опишите конструкцию грузопоршневого манометра. Для каких целейпредусмотрена прессовая часть данных манометров?
14. Допустимо ли использовать дополнительные грузы, не входящие вкомплект грузопоршневого манометра?
15. Какие поправки учитываются при проведении измерений с использованием грузопоршневых манометров?

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Цель работы – ознакомиться с классификацией, классами точности и принципами действия приборов для измерения температуры. Снять показания с приборов и произвести пересчет показаний в различные системы единиц.

Продолжительность занятия: 2 часа.

Оборудование, приборы, инструменты: жидкостные стеклянные термометры, биметаллические пластины, манометрический термометр, разрез манометра манометрического термометра, термопары, вторичные приборы, пирометр, демонстрационный стенд, состоящий из нагревателя, термопар, вторичного прибора.

1. Общие сведения об измерениях температуры

Температура T, К, является условной статистической величиной, прямо пропорциональной средней кинетической энергии частиц:

$$T = 2/3\ (Ek), \qquad (1.1)$$

где E – кинетическая энергия поступательного движения молекул, Дж;

k – постоянная Больцмана, $k = 1{,}3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Измерение температуры тела на практике возможно только путем сравнения нагретости объекта и средства измерения. Для количественной оценки температуры тела существуют температурные шкалы, которые являются функцией изменения физического свойства вещества от температуры.

Единицей измерения температуры в системе СИ по термодинамической температурной шкале принят градус Кельвина, который является 1/273,1/6 части интервала между температурой тройной точки воды

(температуры равновесного состояния водяного пара, жидкой воды и льда) и абсолютным нулем температуры (самой низкой возможной температуры в природе).

Для контактных термометров необходим тепловой контакт первичного преобразователя с измеряемой средой. Бесконтактным термометрам достаточно измерений собственного либо оптического излучения.

Контактные термометры делятся на термометры расширения, манометрические термометры, термопары и термометры сопротивления. Бесконтактные термометры подразделяются на пирометры и тепловизоры

2. Приборы для измерения температуры

2.1 Термометры расширения

Термометр расширения – это прибор, измеряющий температуру объекта, принцип работы которого основан на свойствах тел увеличивать свой объем при нагревании. К термометрам расширения относятся жидкостные, биметаллические и стержневые термометры.

Работа **жидкостного термометра** (рис. 2.1, *а*) основана на объемном расширении жидкости, заключенной в закрытом стеклянном резервуаре *1*. Резервуар соединен с капилляром *2*. В процессе нагревания резервуара жидкость, находящаяся в нем, расширяется и поднимается вверх по капилляру. Высота столба жидкости указывает на величину измеренной температуры среды по шкале *3*. Чем тоньше капиллярная трубка, тем чувствительнее термометр. В качестве рабочей жидкости жидкостного термометра служат ртуть или спирт.

Шкала жидкостного термометра справедлива, когда глубина его погружения равна высоте столбика ртути. Если столбик ртути выступает над уровнем погружения термометра, то температура этой части будет отличаться от температуры погруженного термометра, таким образом, при

отличии температуры внутреннего воздуха от измеряемой среды показания термометра могут быть занижены или завышены. Для исключения ошибок при снятии показаний таких термометров вводят поправку Δt, °С, к показаниям термометра на температуру выступающего столбика, определяемую по следующей формуле [6]:

$$\Delta t = \alpha n(t_{гр} - t_{в}), \quad (2.1)$$

где α – коэффициент линейного расширения столбика жидкости в капилляре, α = 0,00016, значения коэффициентов α для других термометрических жидкостей приведены в табл. 2.1; n – высота выступающей части столбика ртути по шкале, дел., °С; $t_{гр}$ – температура градуировки термометра, °С; $t_{в}$ – температура внутреннего воздуха или окружающей среды в момент измерения, °С.

В табл. 2.2. приведены значения пределов допускаемой абсолютной погрешности измерений технического жидкостного термометра ТТЖ-М.

Таблица 2.1 - Значения коэффициентов линейного расширения термометрических жидкостей

Термометрическая жидкость	Коэффициенты линейного расширения термометрической жидкости α	Сокращенное название термометрической жидкости
Толуол	0,00120	Т
Керосин	0,00093	К
Ртуть	0,00016	Р
Метилкарбитол	0,00093	М

Пример 2.1. Требуется определить поправку на температуру выступающего столбика Δt и действительные показания $t_{д}$ жидкостного термометра. Исходные данные: высота выступающего столбика n = 10 дел.; температура градуировки $t_{гр}$ = 20 °С; температура окружающей среды $t_{в}$ = 40 °С; показания температуры по термометру t = 55 °С; термометрическая жидкость – ртуть.

Таблица 2.2 - Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений термометра ТТЖ-М

Диапазон измерений температуры, °С	Предел допускаемой абсолютной погрешности измерений термометра при цене деления шкалы, °С					
	0,5	1	2	5	10	20
Свыше −50 до −38	±1	±2	-	-	-	-
Свыше −38 до 0	±1	±1	-	-	-	-
Свыше 0 до 100	±1	±1	±2	±5	±5	±10
Свыше 100 до 200	-	±2	±3	±5	±5	±10
Свыше 200 до 300	-	-	±4	±5	±5	±10
Свыше 300 до 400	-	-	±5	±10	±10	±20
Свыше 400 до 500	-	-	-	±10	±10	±20
Свыше 500 до 600	-	-	-	±10	±10	±20

Определим величину поправки Δt, °С, по формуле

$$\Delta t = 0{,}00016 \cdot 10 \cdot (20 - 40) = -0{,}03 \text{ °C}.$$

Действительная температура равна

$$t_д = t + \Delta t = 55 + (-0{,}03) = 49{,}97 \text{ °C}.$$

В настоящее время изготавливают термометры расширения для измерения температур от –100 до 600 °С. Для защиты от механических повреждений термометры помещаются в защитную арматуру.

Достоинством жидкостных термометров является их простота и дешевизна изготовления при удовлетворительной точности. К недостаткам следует отнести неудобство отсчета, запаздывание показаний вследствие большой тепловой инерции, отсутствие возможности автоматической регистрации и передачи показаний на расстоянии, малая точность.

Стержневые (дилатометрические) термометры являются средствами измерения, работа которых заключается в преобразовании изменения температуры исследуемой среды в разность удлинений двух твердых тел, вызванную различием их коэффициентов температурного расширения.

Принцип работы стержневого термометра, приведенного на рис. 2.1, *б*, основан на разности удлинения трубки *5* и стержня *6*. Трубку изготавливают из материала с малым коэффициентом линейного расширения (из кварца, инвара и пр.), а стержень с большим (из алюминия, латуни, меди, стали и пр.). Стержень располагается внутри трубки, один его конец жестко скреплен с дном трубки. Трубка и стержень при нагреве удлиняются на разную величину. Измерение разности этих удлинений характеризует температуру нагрева, которая визуализируется на шкале измерительного прибора посредством механической передачи *7*, *8* с помощью измерительной стрелки *9*.

Изменение длины твердого тела от температуры имеет вид

$$l_к = l_н(1 + \alpha(t_к - t_н)), \qquad (2.2)$$

где α – средний коэффициент линейного расширения, $К^{-1}$; $t_к$, $t_н$ – конечная и начальная температуры стержня, °С; $l_н$, $l_к$ – начальная и конечная длины стержня, м.

Диапазон измерения дилатометрических термометров составляет от −30 до 1000 °С, с относительной погрешностью 1,5…2,5 %. Термометры данной конструкции обладают высокой надежностью и используются в релейных схемах.

Принцип работы **биметаллических термометров** основан на свойстве его биметаллических (изготовленных из двух материалов с разными температурными коэффициентами расширения) пластин, спиралей и пружин изгибаться, раскручиваться и скручиваться при изменении температуры среды.

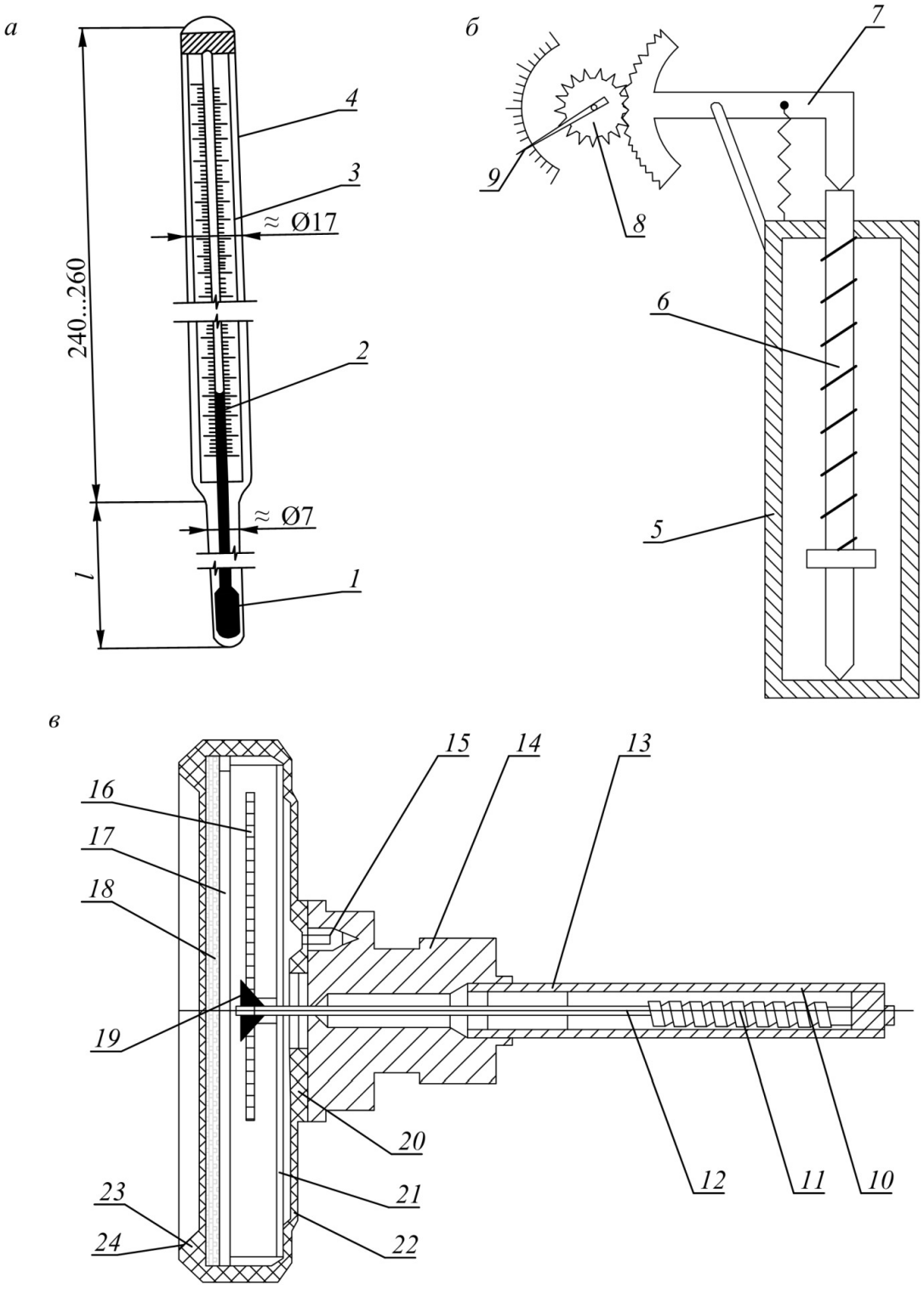


Рис. 2.1. Термометры расширения (*а* – жидкостный; *б* – стержневой; *в* – биметаллический): *1* – стеклянный резервуар; *2* – капилляр; *3*, *21* – шкала; *4* – стеклянная оболочка; *5* – трубка; *6* – стержень; *7* – передача; *8* – шестерня; *9* – измеритель; *10* – труба; *11* – биметаллическая пружина; *12* – ось; *13*, *22* – корпус; *14* – штуцер; *15* – винт; *16* – пружинное кольцо; *17*, *20* – прокладка; *18* – стекло; *19* – стрелка; *23* – резиновое кольцо; *24* – обечайка

Рассмотрим принцип работы биметаллических термометров на примере термометра ТБ-1 (рис. 2.1, *в*), который состоит из термобаллона и показывающей приставки. Термобаллон является трубкой *10*, в которой находится биметаллическая пружина *11*, рассчитанная на определенный диапазон измерений. Пружина приварена к оси *12*, которая вращается при раскручивании и скручивании пружины при изменении её температуры под действием измеряемой среды. Стрелка *19* располагается непосредственно на оси термобаллона. Термобаллон крепится к штуцеру *14*, который, в свою очередь, присоединяется к корпусу *22* с помощью винтов *15*. Ось *12* передает раскручивание (скручивание) пружины стрелке *19*, которая, изменяя свое положение, отображает измерение температуры на шкале *21*.

Диапазон измерений биметаллических термометров составляет от −100 до 600 °С с относительной погрешностью 1…3 %.

Биметаллические и стержневые термометры применяются в качестве сигнализаторов и регуляторов температуры, а не для визуализации показаний температуры среды. Они используются для замыкания или размыкания электрических контактов, включаемых в электрические цепи средств автоматизации арматуры систем отопления, вентиляции, теплоснабжения, холодоснабжения.

2.2. Манометрические термометры

Принцип работы манометрических термометров основан на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего вещества в замкнутой герметической системе.

Схема устройства и внешний вид показывающего манометрического термометра представлена на рис. 2.2 [30]. Термосистема термометра состоит из термобаллона *1*, погружаемого в среду, температура которой измеряется, капилляра *2* и манометрической пружины *3*. Одни конец пружины впаян в держатель *4*, канал которого соединяет полость

манометрической пружины через капилляр с термобаллоном. Другой конец пружины герметизирован и соединен с сектором *6* с помощью поводка *5*. Сектор соединен с трубкой *7*, на оси которого находится указательная стрелка *8*. В передаточном механизме установлена предназначенная для выбора зазора спираль *9*, конец внутреннего витка которой закреплен на оси трубки.

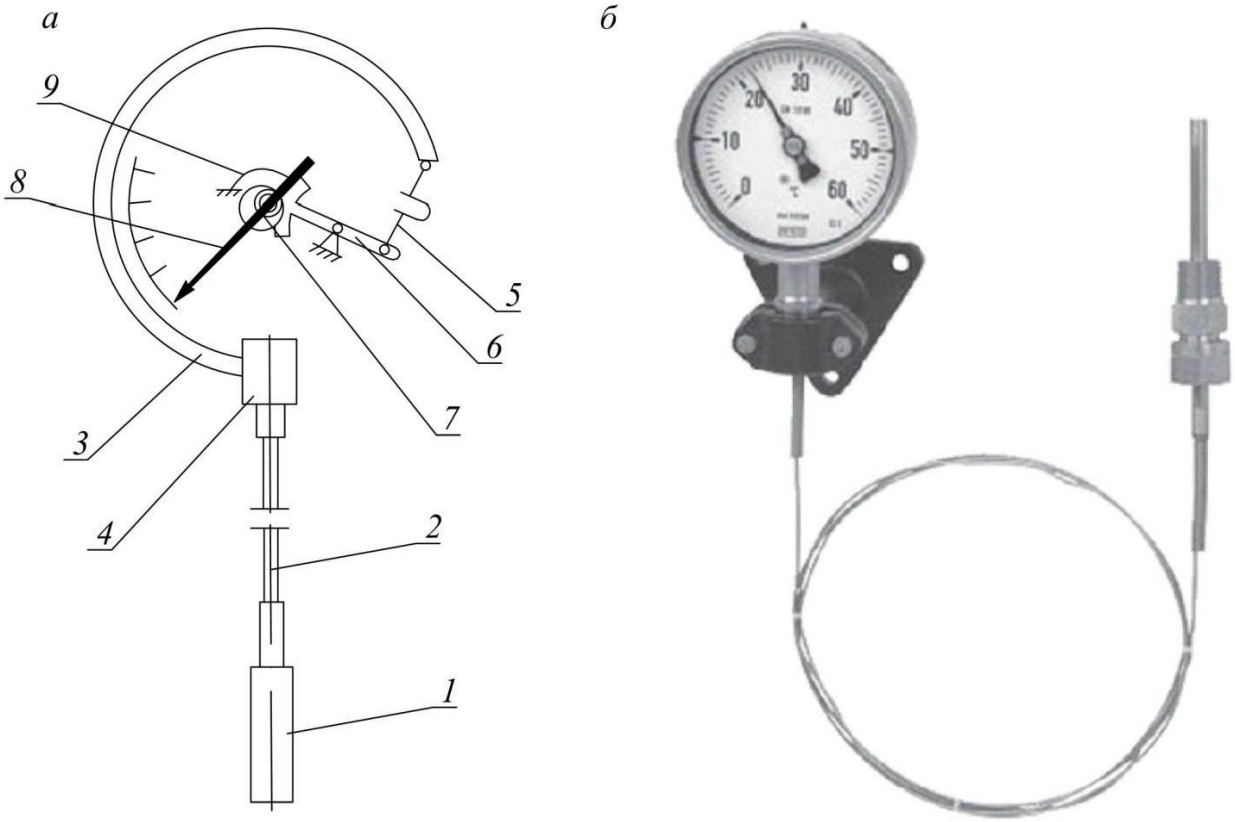


Рис. 2.2. Манометрический термометр (*а* – принципиальная схема; *б* – внешний вид): *1* – термобаллон; *2* – капилляр; *3* – манометрическая пружина; *4* – держатель; *5* – поводок; *6* – сектор; *7* – трубка; *8* – указывающая стрелка; *9* – спираль

При нагревании термобаллона в замкнутой герметизированной системе увеличивается давление газа, в результате чего пружина раскручивается и её свободный конец перемещается. Движение свободного конца пружины передаточным механизмом (поводком, сектором и трубкой) преобразуется в перемещение указателя относительно шкалы прибора. Меняется положение указателя на шкале термометра, которое указывает на значение температуры среды.

Манометрические термометры в зависимости от агрегатного состояния рабочего вещества, применяемого в термосистеме, подразделяются на газовые, конденсационные (парожидкостные) и жидкостные.

В **газовых манометрических термометрах** в качестве наполнителя, как правило, используют азот, аргон или гелий. Зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме имеет вид

$$p_к = p_н[1+\beta(t_к - t_н)], \qquad (2.3)$$

где $t_к$, $t_н$ – конечная и начальная температуры, °С; p_t, p_0 – давления газа при температурах $t_к$ и $t_н$, Па; β – коэффициент температурного расширения газа, $К^{-1}$, для идеального газа – β = 0,003661 $К^{-1}$; для азота β = (0,003661 – 0,000013p_0).

Конденсационные манометрические термометры имеют термобаллон, заполненный ориентировочно на 3/4 жидкостью с низкой температурой кипения и на 1/4 насыщенным паром этой жидкости. Капилляр и манометрическая пружина также заполнены жидкостью. Количество жидкости должно быть таким, чтобы при максимальной температуре не вся жидкость переходила в пар.

В качестве заполнителя данных термометров применяют ацетон, хлористый метил, хлористый этил, спирт, толуол, фреон-22 и пр. Давление в термосистеме будет равно давлению насыщенного пара наполнителя, определяемому температурой измеряемой среды, в которой находится термобаллон. Если измеряемая температура ниже критического значения, зависимость давления насыщенного пара от температуры определяется однозначно. На показания данных термометров не будет оказывать влияние температура окружающей среды, однако для данных термометров существует гидростатическая погрешность, вызываемая разностью высот термобаллона и измерительного прибора. Для снижения влияния данной погрешности на результаты измерения длину капилляра принимают не более 10…25 м в зависимости от типоразмера прибора.

Жидкостные манометрические термометры заполняются пропиловым алкоголем, метансилолом, силиконовыми жидкостями и пр. Для жидкостных термометров устанавливается минимальная из манометрических термометров длина капилляра 0,6…10 м. Данные термометры существенно отличаются от газовых и конденсационных, так как в них применяются практически несжимаемые жидкости. Объем термобаллона таких термометров должен быть определен для конкретной рабочей жидкости, согласован с диапазоном измерения прибора, с изменением объема внутренней полости манометрической пружины при рабочем ходе её свободного конца и с изменением давления в термосистеме. При нагреве термобаллона от $t_н$ до $t_к$ жидкость расширяется, термобаллон увеличивает свой объем.

Манометрические термометры могут выпускаться как показывающими, так и дополнительно оснащенными электронными устройствами для фиксации результатов измерений, они могут работать в условиях вибрации, взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

2.3 Термопреобразователи сопротивления

Термопреобразователи сопротивления (ТС) являются наиболее распространенными преобразователями температуры, использующимися в цепях измерения и регулирования (системы регулирования расхода и температуры теплоносителя в автоматизированных индивидуальных тепловых пунктах, узлах смешения тепломассообменного оборудования приточных и приточно- вытяжных установках систем вентиляции и пр.). Принцип работы термопреобразователя сопротивления основан на зависимости электрического сопротивления R_t, Ом, термопреобразователя от измеряемой температуры t, °С.

Схема устройства термопреобразователя представлена на рис. 2.3, *а*. Чувствительный элемент (ЧЭ) *1* погружается в измеряемую среду, после

чего измеряется его величина сопротивления. Результаты измерений изменения сопротивления чувствительного элемента передаются через выводы *3* к кабелю *10*, который присоединяется к вторичному устройству, где записывается и показывается численное значение измеренной температуры, определяемое по функциональной зависимости $R_t = f(t)$.

Чувствительный элемент представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или пленки, с выводами для крепления соединительных проводов, имеющих известную зависимость $R_t = f(t)$. Чувствительные элементы термопреобразователей сопротивления могут изготавливаться из платины, меди и никеля [12]. Наибольшее распространение в настоящее время получили чувствительные элементы из меди и платины. Классификация термопреобразователей сопротивления в зависимости от типа чувствительного элемента представлена в табл. 2.3, где указаны классы допуска, регламентируемые ГОСТ [12], и температурный коэффициент α, $°C^{-1}$, термопреобразователя. Особенности конструкции чувствительных элементов в зависимости от изготавливаемогоматериала представлены на рис. 2.3 [16, 23].

Платиновый чувствительный элемент (рис. 2.3, *б*) состоит из двух спиралей *1* в каналах керамического каркаса *2*, заполненных порошком *3*. Порошок является изолятором и улучшает тепловой контакт проволоки с каркасом. Спирали присоединены к контактам из платиновой или иридиевой проволоки *4*. Торцы каркаса герметизируются специальной глазурью *5*, каркас помещается в металлическую оболочку, которая заполняется порошком.

Медный чувствительный элемент состоит из медной изолированной проволоки, которая может быть либо намотана на каркас (рис. 2.3, *в*), либо быть бескаркасной (рис. 2.3, *г*), в этом случае отдельные слои проволоки скрепляются лаком и обертываются защитной фторопластовой пленкой. К недостаткам медных ТС и ЧЭ можно отнести интенсивную окисляемость и малое удельное сопротивление, что ограничивает диапазон измеряемых

ими температур и требует большего расхода проволоки, а это увеличивает размеры ЧЭ.

Зависимость $R_t = f(t)$ чувствительного элемента (или термопреобразовате- ля сопротивления) называется номинальной статической характеристикой [12].

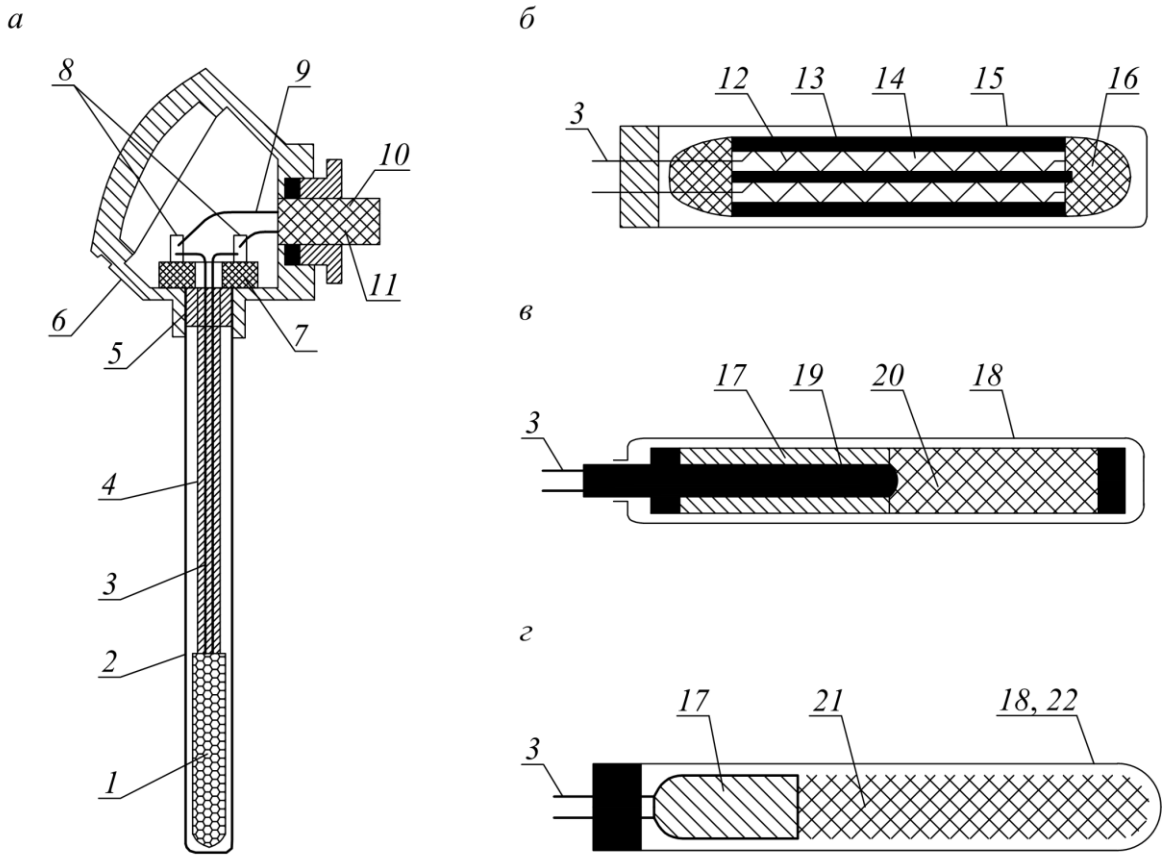


Рис. 2.3. Термопреобразователь сопротивления (*а* – общая схема; *б* – чувствительный элемент платинового термопреобразователя; *в* – то же медного термопреобразователя с каркасной обмоткой; *г* – то же медного термопреобразователя с бескаркасной обмоткой): *1* – чувствительный элемент; *2* – защитная арматура; *3* – выводы; *4* – изоляция; *5* – герметик; *6* – головка; *7* – клеммная сборка; *8* – зажимы; *9* – жилы кабеля; *10* – кабель; *11* – гайка; *12* – платиновая спираль; *13* – керамический каркас; *14* – изоляционный порошок; *15* – металлическая оболочка; *16* – глазурь; *17* – намотка; *18* – защитная оболочка; *19* – каркас; *20* – слой лака; *21* – фторопластовая оболочка; *22* – изолирующий порошок

Для измерения температур в диапазоне от −200 до 850 °С применяются платиновые ТС, от −200 до 200 °С – медные ТС; от −60 до 180 °С –

никелевые ТС. В отдельных случаях ТС используют для измерения температур до 1000 °С.

Таблица 2.3 - Классификация термопреобразователей сопротивления

Тип ТС	Обозначение	α, °С$^{-1}$	Класс допуска		
			Проволочный ЧЭ	Пленочные ЧЭ	ТС
Платиновый	Pt	0,00385	W 0.1, W 0.15, W 0.3, W 0.6	F 0.1, F 0.15, F 0.3, F 0.6	AA, A, B, C
	П	0,00391	AA, A, B, C	AA, A, B, C	AA, A, B, C
Медный	М	0,00428	A, B, C	-	A, B, C
Никелевый	Н	0,00617	C	-	C

2.4 Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), развиваемой термопарой, от температуры её рабочего конца. Данные термопреобразователи являются одними из самых распространенных средств измерения температуры наряду с термопреобразователями сопротивления. Возникающая в цепи термопары ЭДС является результатом действия эффектов Зеебека и Томпсона. Эффект Зеебека связан с появлением ЭДС в месте спая двух разнородных проводников, величина ЭДС в данном случае будет зависеть от температуры спая. Эффект Томпсона связан с возникновением ЭДС в однородном проводнике при наличии разности температур на его концах.

Термоэлектрические преобразователи подразделяются на термопреобразователи общепромышленного и специального назначения. На рис. 2.4, *а* [16] представлена схема устройства термоэлектрических преобразователей обще промышленного назначения. Электроды *1* термопреобразователя выполняют из проволоки, обеспечивающей

пренебрежимо малое сопротивление термопары и достаточную механическую прочность. Для изоляции термоэлектродов используются кварцевые или фарфоровые трубки *3*. Рабочий спай *2* защищается механическим наконечником *5*. Защитная арматура *4* присоединяется к головке *7*, в которой располагается сборка *8* и зажимы *9*. К зажимам *9* подводятся электроды термопары с одной стороны и термоэлектродные удлиняющие провода *10* через герметизированный ввод *11*.

Специальные термопреобразователи изготавливаются на основе кабельных термопреобразователей, которые предназначены для измерения температур от –50 до 1000 °С и в основном используются в реакторной термометрии.

Схема устройства кабельного термопреобразователя представлена на рис. 2.4, *б*. Для измерения температуры в нескольких точках используются кабельные многозонные термопреобразователи (рис. 2.4, *в*).

Термопара – это два проводника из разнородных материалов, соединенных на одном конце и образующих часть устройства, использующих термоэлектрический эффект для измерения температуры. Общепринятые обозначения термопар в зависимости от наименования промышленного термопреобразователя представлены в табл. 2.4 [11].

Основными техническими характеристиками термопар являются номинальная статическая характеристика (НСХ), диапазон преобразований темпера- тур термопары и допускаемое отклонение от НСХ.

Номинальная статическая характеристика – это номинально приписываемая термопаре данного типа зависимость термо-ЭДС от температуры рабочего конца t при постоянно заданной температуре свободных концов, выраженная в милливольтах.

Современные термопреобразователи сопротивления изготавливаются для проведения измерений в диапазоне от −270 до 2200 °С.

Таблица 2.4 Обозначения термопары в зависимости от наименования термопреобразователя

Обозначение типа термопары	Наименование промышленного термопреобразователя
R	ТПП (платина – 13 %; родий/платина)
S	ТПП (платина – 10 %; родий/платина)
B	ТПР (платина – 30 %; родий/платина – 6 %; родий)
J	ТЖК (железо/медь – никель (железо/константан)
T	ТМК (медь/медь – никель (медь/константан)
E	ТХКн (никель – хром/медь – никель (хромель/константан)
K	ТХА (никель – хром/никель – алюминий (хромель/алюминий)
N	ТНН (никель – хром – кремний/никель – кремний (нихросил/нисил)
A	ТВР (вольфрам – рений/вольфрам – рений)
L	ТХК (хромель-копель)
M	ТМК (медь/копель)

2.5 Дилатометрические термографы

Измерение температуры дилатометрическими термометрами основано на явлении теплового расширения твердых тел при нагревании. Приемником дилатометрических термометров служит биметаллическая пластина, состоящая из двух сваренных или спаянных разнородных металлических полосок с разными термическими коэффициентами расширения. При изменении температуры данные пластины изгибаются, а при закреплении одного из их концов другой конец будет перемещаться. Величина изгиба или перемещения пластинки показывает фактическую температуру окружающей среды. Данный способ широко используется в самописцах, регистрирующих изменение температуры наружного воздуха (термографах) на метеостанциях [13].

Схема дилатометрического термографа представлена на рис. 2.5. Термограф состоит из корпуса 7, закрывающегося крышкой 1. К стенке корпуса прикрепляется консоль 2, в вилку которой вставлена колодка 4 с биметаллической пластинкой 5. К биметаллической пластинке прикреплен рычаг 8, который, проходя через щель корпуса, шарнирно соединяется с

тягой 12. Тяга соединена с осью 6, на которой закреплена стрелка 11 с пером 9. При изменении температуры свободный конец пластинки при помощи рычажной системы перемещает перо по ленте, которая закреплена на барабане 10. Барабан вращается вокруг своей оси с помощью часового механизма. Начальное положение пера относительно ленты устанавливается винтом 3. Перо представляет собой призму, заполненную специальными чернилами.

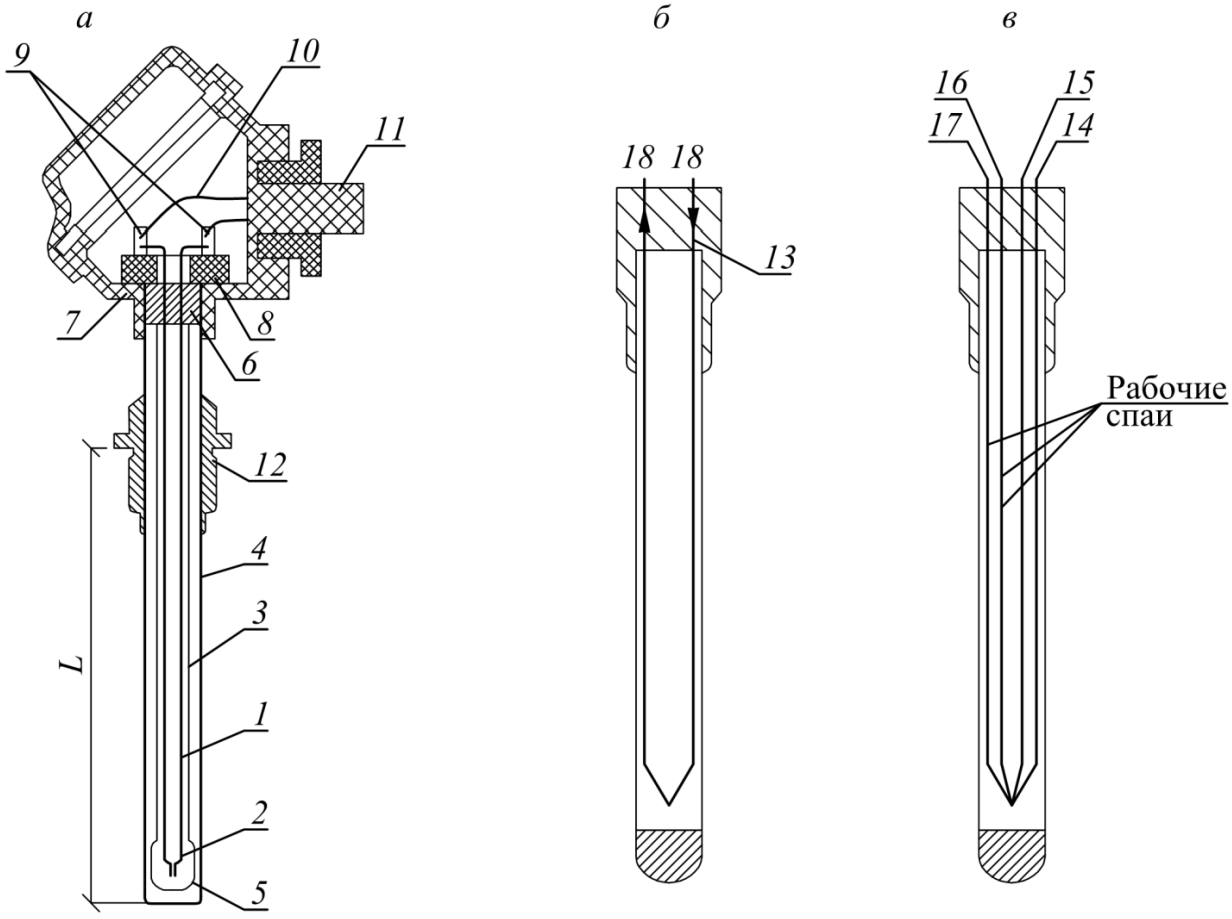


Рис. 2.4. Термоэлектрический преобразователь (*а* – общая схема; *б* – однозонный термоэлектрический преобразователь; *в* – многозонный термоэлектрический преобразователь): *1* – электроды; *2* – рабочий пай; *3* – трубка; *4* – защитная арматура; *5* – керамический наконечник; *6* – заливка; *7* – головка; *8* – сборка; *9* – зажимы; *10* – удлиняющий провод; *11* – герметизированный ввод; *12* – элементы крепления; *13* – герметик; *14*, *15*, *16*, *17*, *18* – жилы кабельного преобразователя

Термограф предназначен для регистрации плавных изменений температуры, так как при резких температурных колебаниях он за счет инерции может давать большие погрешности. Одним из преимуществ прибора является его безотказность и простота эксплуатации.

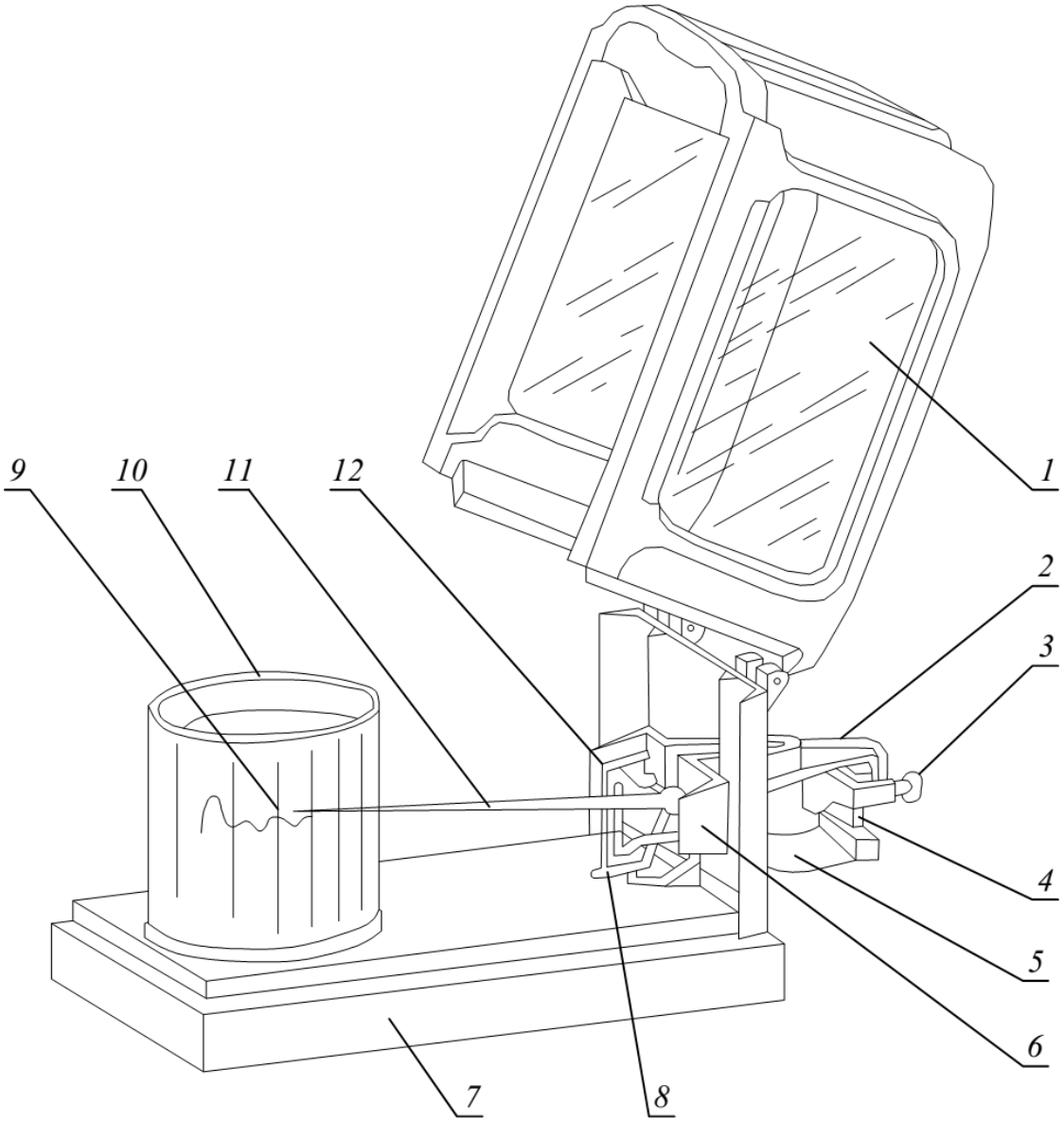


Рис. 2.5. Дилатометрический термограф: *1* – крышка; *2* – консоль; *3* – винт; *4* – колодка; *5* – биметаллическая пластина; *6* – ось; *7* – корпус; *8* – рычаг; *9* – перо; *10* – барабан;*11* – стрелка; *12* – тяга

Прибор не является точным, что требует для получения более достоверных измерений вводить поправки на основании определения

температуры воздуха (не менее четырех раз в сутки) по психрометрическому или любому другому точному термометру.

Обработка записей термографа проводится в такой последовательности: записи на ленте разбивают на часовые интервалы; определяются ежемесячные значения температуры; рассчитываются поправки для ежемесячных значений; вычисляют значения температур с учетом введенных поправок.

Результатом замеров температуры является нанесение температур с учетом поправок на ленту термографа, с указанием объекта, где проводились замеры, места установки прибора, даты и часа начала и окончания измерений, а также номера самописца.

2.6 Пирометры

Пирометры – это приборы для измерения температуры, действие которыхосновано на измерении теплового излучения.

Пирометры предназначены для контроля температур от 100 до 6000 °С. К главным достоинствам пирометров следует отнести возможность проведение дистанционного контроля за температурой объектов, находящихся на значительном расстоянии от прибора, а также отсутствие влияния измерительного прибора на объект исследования. Пирометры подразделяются на пирометры частичного и полного излучения и спектрального отношения.

Пирометры частичного излучения измеряют яркостную температуру объекта. Яркостной температурой нечерного тела, имеющего температуру T, К, называется такая температура $T_я$, К, абсолютно черного тела, при которой его яркость (светимость) для узкой области спектра равна яркости (светимости) исследуемого тела в той же спектральной области при температуре T.

К данному типу пирометров относятся оптические и фотоэлектрические пирометры. Рассмотрим наиболее распространенный тип данных приборов – оптический пирометр с исчезающей нитью (рис. 2.6 [29]).

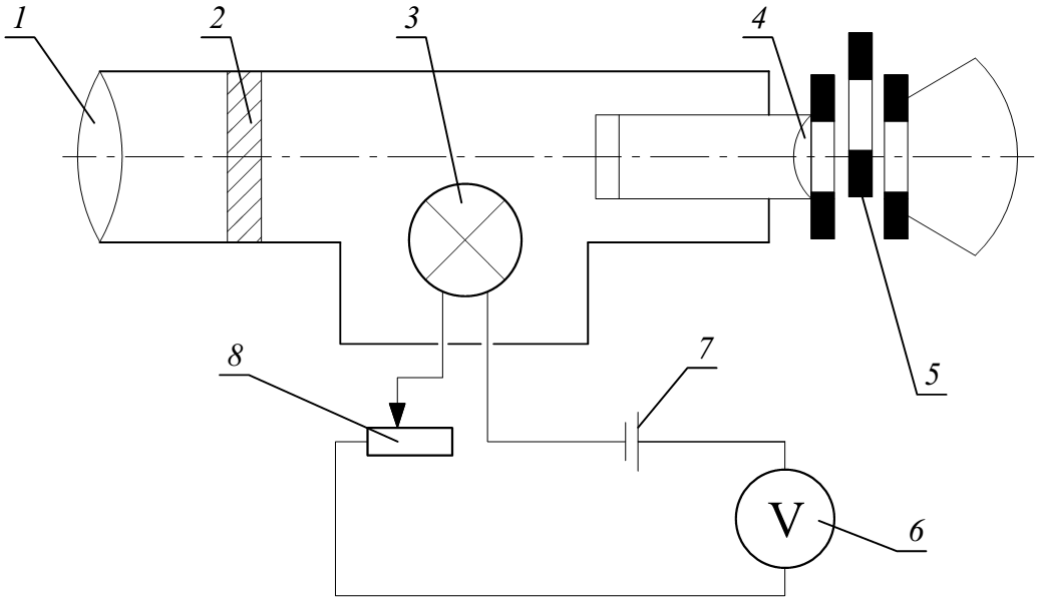


Рис. 2.6. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью: *1* – линза; *2* – поглощающий светофильтр; *3* – лампа накаливания; *4* – линза окуляра; *5* – красный светофильтр;*6* – милливольтметр; *7* – источник тока; *8* – реостат

Принцип действия данного пирометра основан на сравнении яркости монохроматического излучения эталонного тела (лампы накаливания) и объекта измерений. Оптическую систему прибора наводят на тело и передвигают объектив с целью получения четкого изображения объекта и нити лампы. Затем включают источник тока и регулируют яркость нити с помощью реостата до тех пор, пока её средняя часть не сольется с освещенным телом. С милливольтметра снимают показания, соответствующие яркостной температуре $T_я$.

Максимальная температура, измеряемая оптическими пирометрами, как правило, составляет 1400 °С, что связано с распылением вольфрамовой нити лампы при более высоких температурах. При установке серого светофильтра, обеспечивающего максимальную температуру нагрева нити

не более 1400 °С, верхний предел измерений прибора может быть значительно увеличен. В современном приборостроении выпускаются пирометры с диапазоном измеряемых температур до нескольких тысяч градусов.

Пирометры спектрального отношения применяются для определения цветовой температуры объекта измерения. Цветовая температура $T_ц$, К, – это температура реального тела, при которой отношения плотностей потоков излучения абсолютно черного тела и реального тела будут равны при действительной температуре T для двух длин волн λ_1 и λ_2.

Принципиальная схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом приведена на рис. 2.7 [26]. Измеряемое излучение через защитное стекло объектива попадает на фотоэлемент. Между объективом и фотоэлементом установлен вращающийся обтюратор.

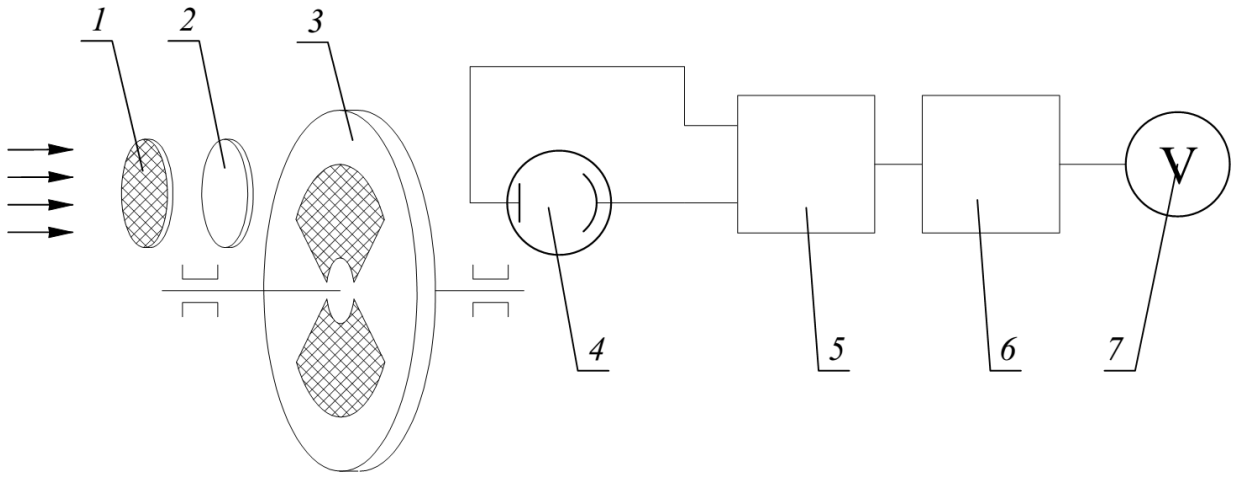


Рис. 2.7. Схема пирометра спектрального отношения с фотоэлементом: *1* – защитное стекло; *2* – объектив; *3* – обтюратор; *4* – фотоэлемент; *5* – электронный усилитель; *6* – логарифмирующее устройство; *7* – милливольтметр

Обтюратор представляет собой диск с двумя отверстиями, одно из них закрыто красным светофильтром, а другое – синим. При вращении обтюратора на него попеременно попадают излучения, соответствующей

спектральной энергетической яркости E_1 и E_2, Вт/(м^2·ср·нм), так как $E_1 = f(\lambda_1)$ и $E_2 = f(\lambda_2)$, то $T_ц = f(E_1/E_2)$. Вырабатываемые фотоэлементом попеременные импульсы электрического тока подаются на электронный усилитель и логарифмирующее устройство, где преобразуются в ток I, мА.

Значения напряжения U, мВ, электрического тока I выводятся на милливольтметр, который отградуирован на показание цветовой температуры $T_ц$. Определив значение $T_ц$, рассчитывают температуру T по формуле (2.16).

Предел измерения современных пирометров спектрального отношения составляет от 300 до 2800 °С с относительной погрешностью измерений ±1 °С.

Пирометры полного излучения предназначены для измерения радиационной температуры объекта. Радиационная температура $T_р$, К, – это такая температура, при которой полная мощность абсолютно черного тела равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре T.

В пирометрах полного излучения (рис. 2.8 [6]) используется тепловое действие полного излучения нагретого тела. Чувствительным элементом в радиационных пирометрах является термобатарея из нескольких миниатюрных последовательно соединенных термопар. Рабочие спаи термопар нагреваются излучением, фокусируемым объектом измерения с помощью оптической системы. Возникающая термо-ЭДС измеряется с помощью милливольтметра, градуированного в градусах радиационной температуры $T_р$, К.

Пирометры полного излучения применяются для измерения объектов с невысокой температурой, при которых отсутствует видимое излучение, в том числе измерения температуры тел, более холодных, чем окружающая среда.

Современные пирометры полного излучения применяются для измерениятемператур объектов в диапазоне от −40 до 3500 °С.

Абсолютная погрешность измерения температуры с применением пирометров полного излучения возрастает с увеличением измеряемой действительной температуры t, °С, и составляет: при t = 1000 °С – Δt = ±12 °С; приt = 2000 °С – Δt = ±20 °С; при t = 3000 °С – Δt = ±35 °С.

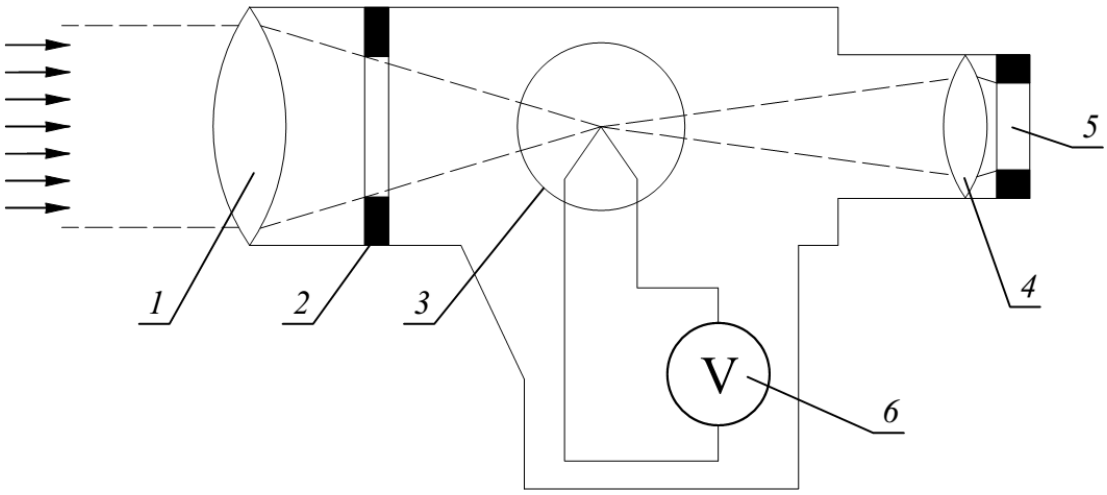


Рис. 2.8. Схема пирометра полного излучения: *1*, *4* – линзы; *2* – диафрагма; *3* – термобатарея; *5* – окуляр; *6* – милливольтметр

2.7 Тепловизоры

Тепловизоры – это оптико-электронные приборы пассивного типа, работающие в инфракрасном диапазоне спектра излучения. Тепловизоры предназначены для теплового неразрушающего контроля наружных ограждающих конструкций, оборудования и систем тепло- и электроэнергетики [3, 4].

Принцип работы тепловизоров заключается в принятии и обработке инфракрасного излучения объекта исследования с преобразованием его в видимоеизображение теплового поля (термограмму).

По способу получения изображения тепловизоры подразделяются на сканирующие (оптико-механические) и матричные.

В зависимости от спектрального диапазона тепловизоры делятся на коротковолновые (длина волны от 3 до 5 мкм соответствует

средневолновому инфракрасному диапазону) и длинноволновые (длина волны от 8 до 14 мкм).

Оптико-механические тепловизоры производятся с 50-х годов XX века. Наибольшее распространение получили два типа оптико-механического сканирования: использование вращающихся во взаимно перпендикулярных направлениях кремниевых призм; использование колеблющихся зеркал.

Схема работы оптико-механического тепловизора приведена на рис. 2.9. Излучение объекта попадает в объектив, в котором происходит его сканирование по кадрам с помощью плоского колеблющегося зеркала, а по строке – вращающейся пропускающей призмой. Затем излучение направляется через плоское зеркало и систему линз в одноэлементный приемник.

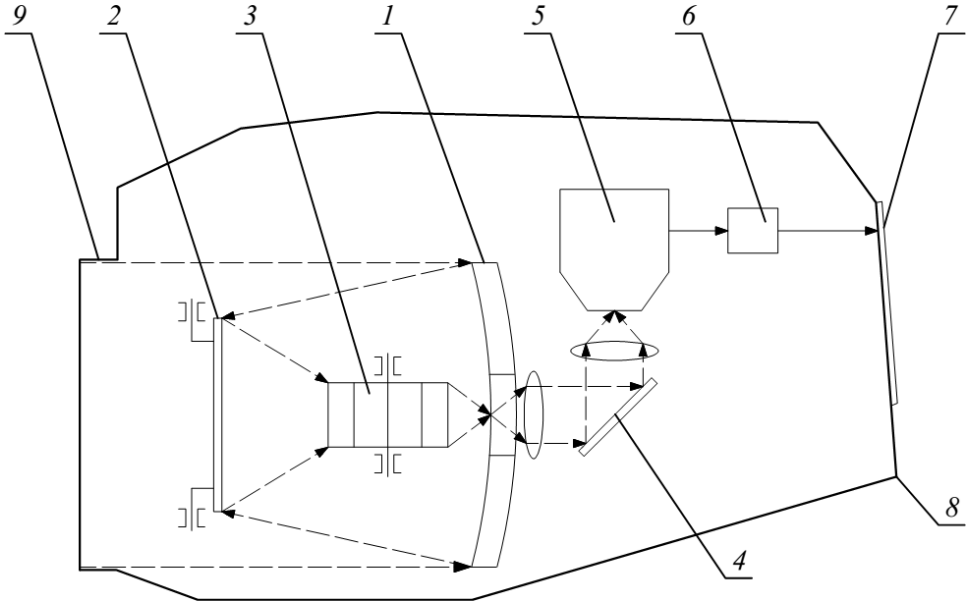


Рис. 2.9. Принципиальная схема оптико-механического тепловизора: *1* – зеркальный объектив; *2* – плоское колеблющееся зеркало; *3* – вращающаяся призма; *4* – плоское зеркало; *5* – приемник; *6* – блок усиления, аналого-цифрового преобразования, корректировки и формирования изображения; *7* – дисплей; *8* – корпус; *9* – вход объектива

С целью поддержания рабочей температуры приемника его охлаждают жидким азотом. От приемника полученный сигнал

направляется к блоку, в котором происходят усиление, аналого-цифровое преобразование, корректировки и формирование изображения термограммы, выводимой на дисплей.

В конце XX века были разработаны матричные фотодетекторы, не имеющие движущихся механических частей. Современные матрицы используют фотонные и тепловые ИК-приемники. Наибольшее распространение в настоящее время получили фотонные матрицы на основе таких соединений, как силицид платины PtSi, антимонид индия IsSb и арсенид галлия GaAs.

Принципиальная схема работы **матричного тепловизора** приведена на рис. 2.10.

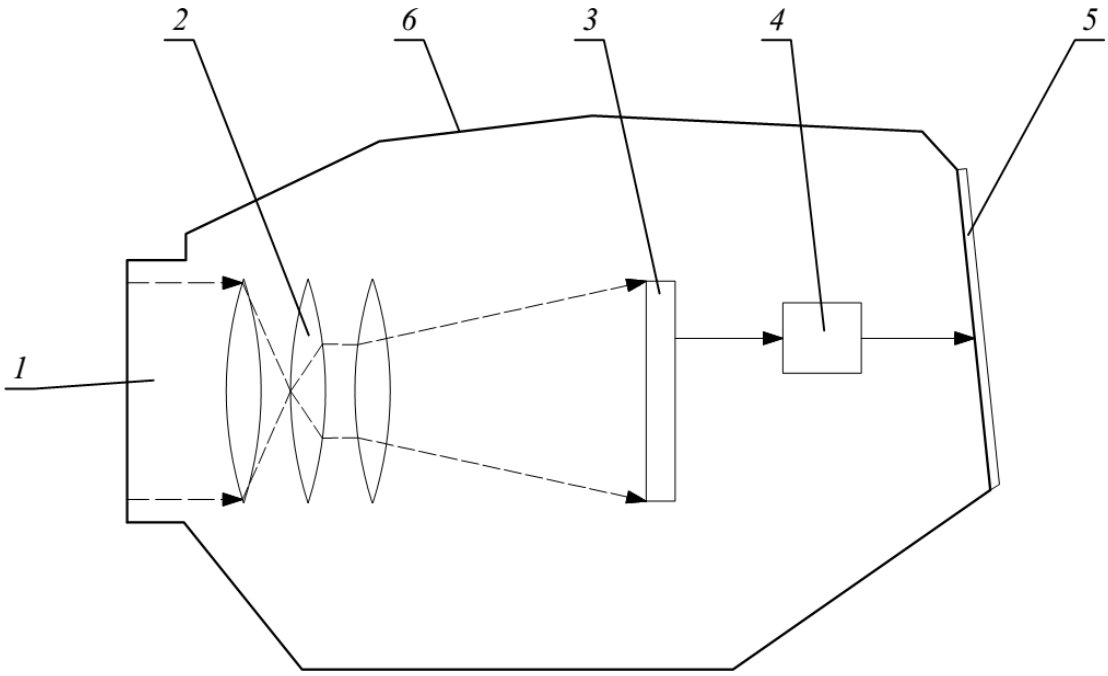


Рис. 2.10. Принципиальная схема матричного тепловизора: *1* – объектив; *2* – система линз объектива; *3* – матричный фотодетектор; *4* – блок аналого-цифрового преобразования, корректировки и формирования изображения; *5* – дисплей; *6* – корпус

Принцип его работы заключается в фокусировке инфракрасного из лучения исследуемого объекта, попавшего в область зрения тепловизора, с помощью оптической системы линз объектива на матричный фотодетектор, выполненный из кристаллов кремния, в котором происходит изменение электрического сопротивления или напряжения. Изменения обрабатываются в блоке аналого-цифрового преобразования. Сформированное изображение распределения температуры отображается на дисплей.

Отраженной температурой $T_{отр}$ является средняя температура окружающей среды и объектов излучения, определяемая по методу диффузно отражающей алюминиевой фольги. Отраженная температура является важным показателем, который вводится в интерфейс тепловизора при проведении измерений.

Современные тепловизоры изготавливаются в стационарном и переносном исполнении с функцией аудиозаписи и видеотермографирования.

Диапазон измерений тепловизоров, применяемых для решения профессиональных задач теплового неразрушающего контроля заданий, сооружений и инженерных систем, составляет от –30 до 650 °С с абсолютной и относительнойпогрешностью ±2 °С и ±2 % соответственно.

К наиболее известным отечественным и зарубежными производителям тепловизионного оборудования следует отнести «Иртис», Fortuna, RGK, Fluke, FLIR Systems, «Инфратех», Testo и др.

Контрольные вопросы.

1. Что такое температура?
2. Опишите принцип работы жидкостных термометров.
3. Перечислите основные конструкции биметаллических термометров.
4. Физический смысл номинальной статической характеристики термопреобразователя сопротивления.
5. В чем заключается принцип работы манометрических термометров?
6. Из каких термоэлектрических материалов изготавливаются термопары?
7. Что такое номинальная статическая характеристика и чувствительностьтермопары термоэлектрического преобразователя?
8. Для каких целей применяются дилатометрические термографы?
9. Приведите классификацию пирометров.
10. Что такое тепловизор. Приведите классификацию тепловизоров поспособу получения изображения (термограммы).
11. Принцип работы оптико-механических тепловизоров.

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Цель работы – ознакомиться с классификацией, классами точности и принципами действия приборов для измерения расхода и количества вещества. Снять показания с приборов и произвести пересчет показаний в различные системы единиц.

Продолжительность занятия: 2 часа.

Оборудование, приборы, инструменты: газовый крыльчатый скоростной счетчик, газовый турбинный скоростной счетчик, водомер, ротационный счетчик газа, ротаметры, демонстрационная установка , состоящая из газового крыльчатого счетчика, воздуходувки, ротаметра.

Общие сведения об измерении количества и расхода веществ

Количество вещества в практике технических измерений, как правило, выражают в единицах массы (кг, г, т и пр.) и объема ($м^3$, л и др.).

Приборы для измерения количества вещества, протекшего через них за известный промежуток времени, называются счетчиками.

По принципу действия счетчики жидкостей и газов подразделяются на скоростные, объемные, барабанные и ротационные.

К основным характеристикам счетчиков относятся номинальный, характерный и минимальный расходы, а также их калибр. Номинальным называется наибольший длительный расход, при котором погрешность показаний не выходит за установленные пределы, а потеря напора не создает в приборе усилий, приводящих к быстрому износу трущихся деталей прибора. Минимальный расход – это расход, ниже которого значительно возрастает погрешность измерений. Характерный расход – это

расход вещества, проходящего через счетчик в течение часа, при перепаде давления на нем 0,1 МПа. Условный диаметр входного патрубка счетчика называется его калибром.

Расход – это количество вещества, проходящее через сечения канала за единицу времени. Расход подразделяется на массовый (кг/ч, т/ч, кг/с и пр.) и объемный ($м^3$/ч, $м^3$/с, л/с, $м^3$/мин и др.).

Объемный расход вещества L, $м^3$/ч, определяется по формуле

$$L = vf\,, \tag{3.1}$$

где v – скорость потока, м/с; f – площадь поперечного сечения канала, $м^2$.

Массовый расход вещества G, кг/ч, составляет

$$G = L\rho\,, \tag{3.2}$$

где ρ – плотность перемещаемого вещества, кг/$м^3$.

По методу измерения расхода расходомеры подразделяются на расходомеры постоянного и переменного перепада давления, электромагнитные, ультразвуковые, расходомеры Кориолиса, вихревые и калориметрические.

3.1. Скоростные счетчики

Скоростные счетчики предназначены для измерения количества жидкостей. Принцип их работы основан на определении средней скорости движения жидкости $v_{ср}$, м/с. Прошедший через поперечное сечение счетчика объем жидкости V, $м^3$, определяется по формуле

$$V = Lt \,/\, v_{\text{ср}}\, ft\,, \tag{3.3}$$

где f – площадь поперечного сечения потока, $м^2$; t – время измерения, с.

Принципиальная схема скоростного счетчика с винтовой вертушкой приведена на рис. 3.1 [42]. Корпус *1* счетчика присоединяется к трубопроводу с помощью фланцев. Внутри него располагается винтовая вертушка *2*, вращение которой под действием потока жидкости передается через ось *11* передаче *3*. Винтовая вертушка может изготавливаться как из

полимерных материалов, так и из металлов, в зависимости от температуры перемещаемой среды. Через передаточный механизм *5* число оборотов *n* передается счетному механизму *6*. Для выпрямления потока жидкости перед счетчиком предусмотрен струевыпрямитель *9*. Регулирование счетчика осуществляется рычажным приводом *8*.

Скоростные счетчики могут также изготавливаться с крыльчатыми вертушками, располагаемыми перпендикулярно направлению потока жидкости.

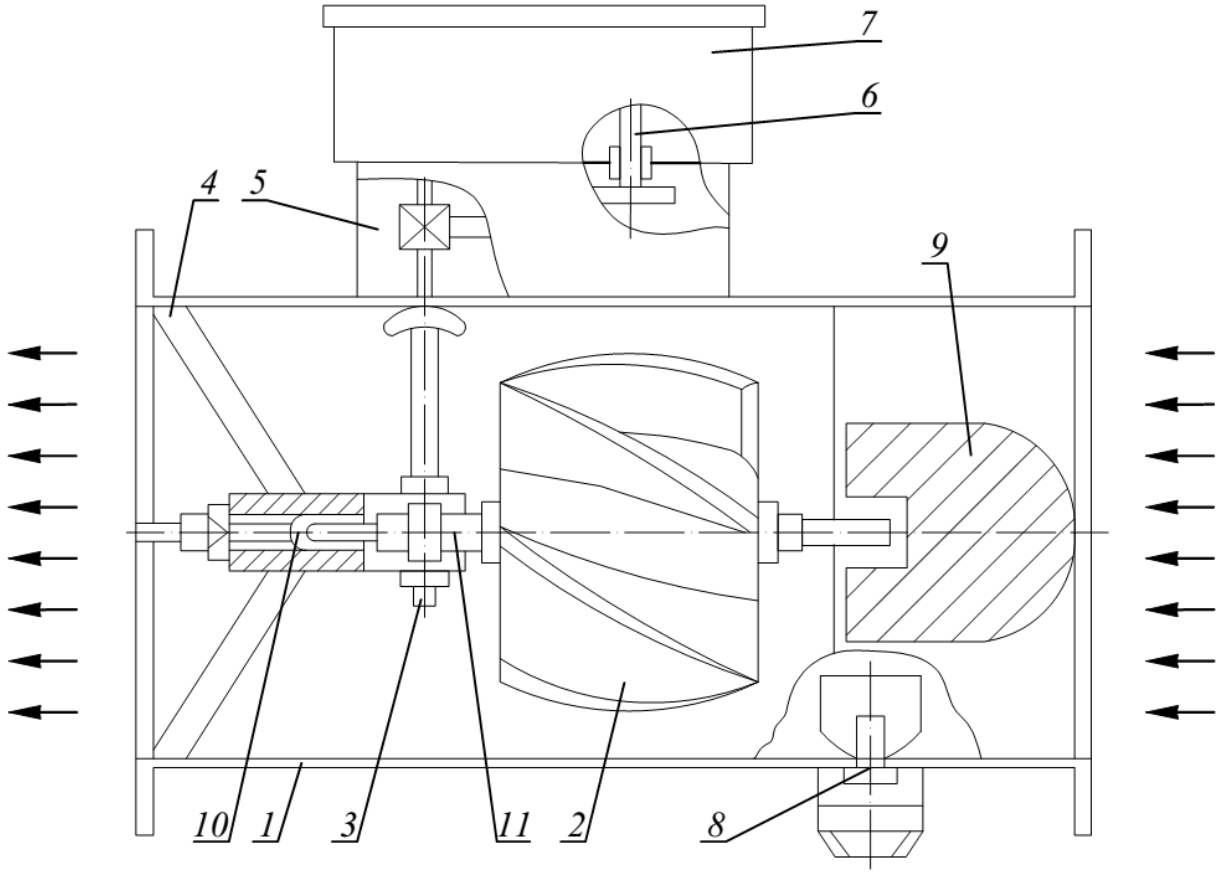


Рис. 3.1. Схема скоростного счетчика с винтовой вертушкой: *1* – корпус; *2* – вертушка; *3* – передача; *4* – крестовина; *5* – передаточный механизм; *6* – счетный механизм; *7* – крыш- ка; *8* – рычажный привод; *9* – струевыпрямитель; *10* – подшипник; *11* – ось вращения

К недостаткам данных счетчиков следует отнести создаваемое ими гидравлическое сопротивление, а также наличие минимальной скорости, при которой вертушка не будет вращаться.

Счетчики с винтовыми вертушками могут применяться для измерения количества жидкости при давлениях до 1,0 МПа и расходах до 600 м^3/ч с относительной погрешностью около 2…3 %.

3.2 Объемные счетчики

Принцип работы объемного счетчика заключается в определении объема жидкости, который был вытеснен из измерительной камеры. Объемные счетчики бывают лопастными и с овальными зубчатыми колесами (рис. 3.2, 3.3).

Рассмотрим работу лопастного счетчика. Через входной патрубок *2* в расходомер поступает вода, проходящий поток которой крутит крыльчатку *3*. Крыльчатка приводит в движение ось *4*, которая через шестеренки передает число оборотов крыльчатки на измерительный прибор.

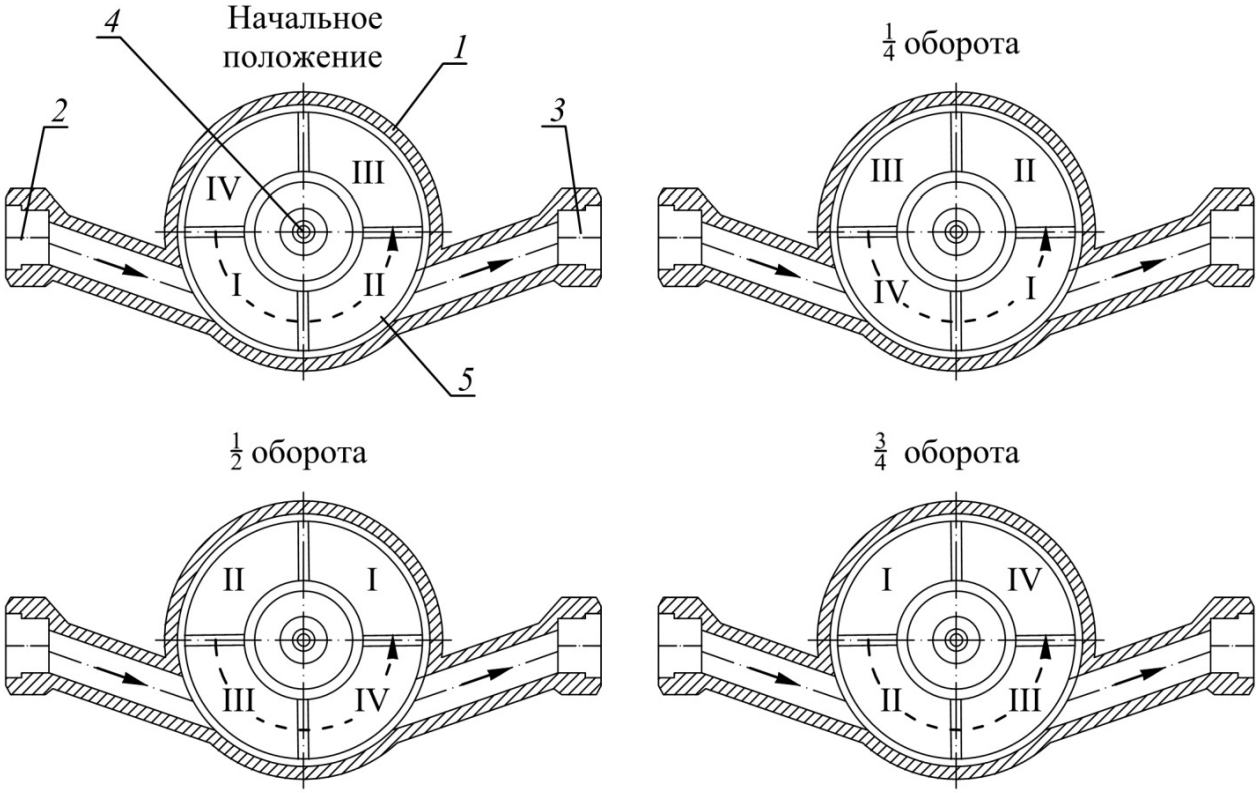


Рис. 3.2. Объемный лопастной счетчик: *1* – корпус; *2*, *3* – патрубки; *4* – ось; *5* – крыльчатка

Число оборотов крыльчатки соответствует количеству отсеченных объемов жидкости, заключенных в полостях I–IV между лопастями и корпусом счетчика. Счетчик суммирует показания измерительного прибора за период измерения. Изменение расхода воды фиксируется на приборной шкале.

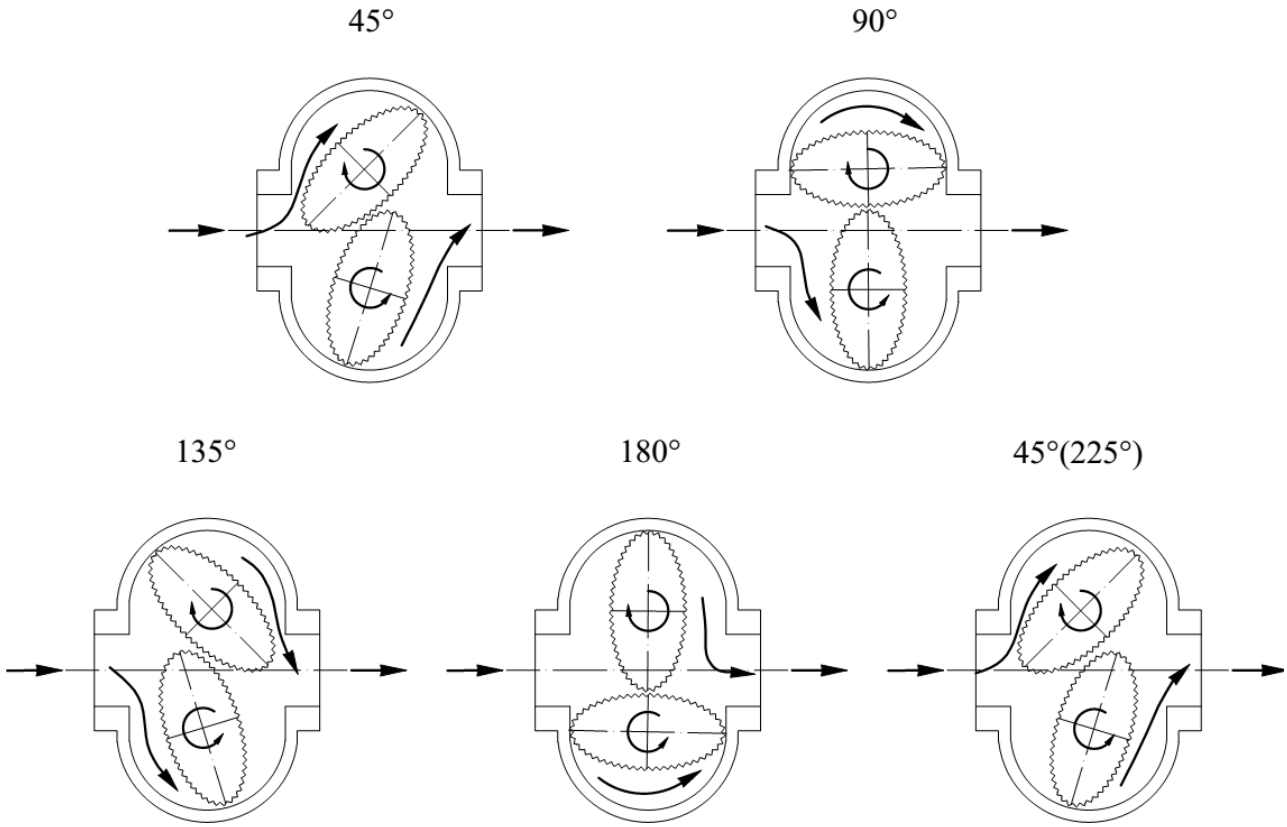


Рис. 3.3. Схема работы объемного счетчика с овальными зубчатыми колесами

Схожий принцип работы имеет объемный счетчик с овальными зубчатыми колесами. Овальные колеса счетчика расположены относительно друг друга таким образом, что каждое из них попеременно является ведущим и ведомым. При повороте одного овального колеса на 45, 90, 135 и 180° отсекается известный объем жидкости. Счетчики с овальными колесами предназначены для определения количества жидкости при рабочих давлениях до 1,57 МПа. Относительная погрешность измерений составляет ±0,5 %.

3.3 Барабанные счетчики

Барабанные счетчики предназначены для определения объема, проходящего через него газа. Принципиальная схема барабанного счетчика приведена на рис. 3.4 [42]. Счетчик представляет собой кожух *3*, который чуть более чем на половину заполнен затворной жидкостью. В кожухе вращается барабан *4*, разделенный четырьмя радиальными и одной цилиндрической перегородками на четыре внешних I–IV и одну внутреннюю V камеры. Во внутреннюю камеру V через входной патрубок *2* подается газ. Радиальные перегородки сконструированытаким образом, что газ попеременно заполняет камеры I–IV. Входные а–г и выходные д–з щели камер никогда не находятся выше уровня жидкости одновременно, что исключает прямой переток газа из патрубка *2* в патрубок *1*.

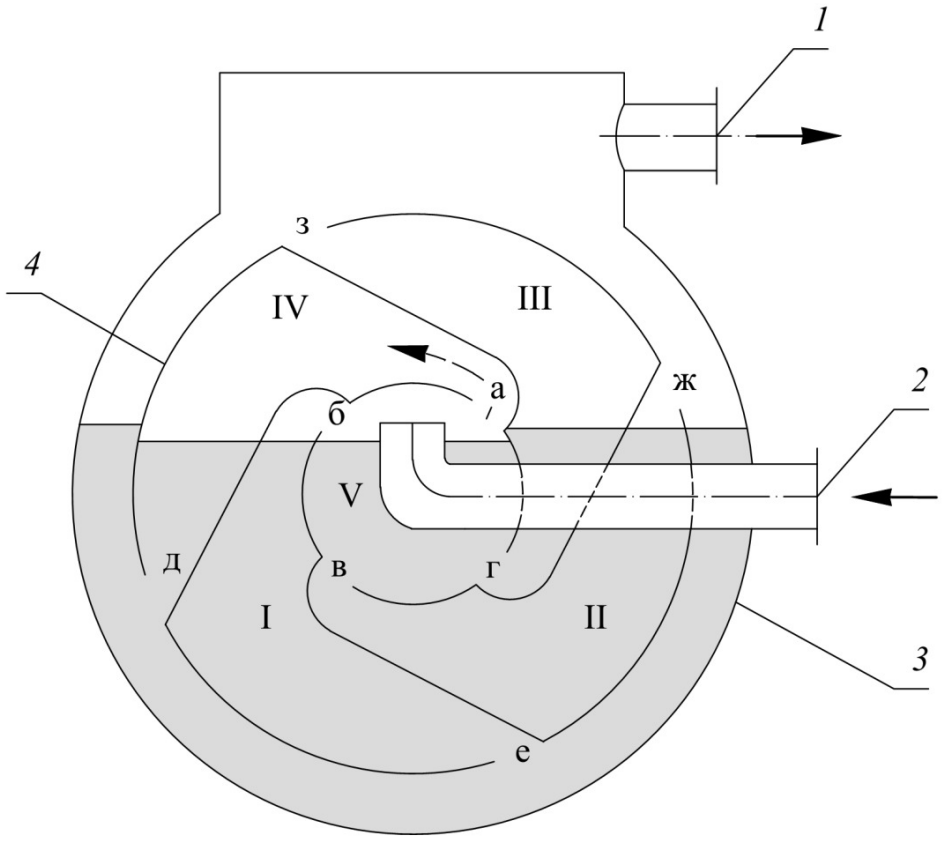


Рис. 3.4. Схема барабанного счетчика газа: *1* – выходной патрубок; *2* – входной патрубок; *3* – кожух; *4* – барабан

При создании перепада давления между патрубками *1* и *2* возникает разница давлений, которая приводит в движение барабан. Вращение барабана при водит к поступлению и вытеснению объемов газа, равных объему из камер I–IV, в корпус счетчика через щели а–г и д–з. Один полный оборот барабана соответствует суммарному объему камер I–V.

В качестве запирающей жидкости применяется вода, а при отрицательных температурах – водные растворы хлорида магния или глицерин. Для контроля уровня жидкости кожух счетчик оборудуют смотровым стеклом.

Барабанные счетчики предназначены для измерения количества газа при небольших объемных расходах (до 3 м3/ч) с относительной погрешностью измерений, не превышающей 0,2 %.

3.4 Ротационные счетчики

Ротационные счетчики – это измерительные приборы для определения объема проходящих через них газов.

Принципиальная схема ротационного счетчика приведена на рис. 3.5 [42]. Счетчик представляет собой кожух *2*, внутри которого вращаются на параллельных горизонтальных валах роторы *1*. Валы роторов связаны друг с другом зубчатыми колесами. Один из валов передает вращение счетному механизму. За один оборот обоих роторов объем газа, прошедшего через прибор, равен объему измерительной камеры счетчика.

Ротационные счетчики применяются для определения количества газа при расходах от 40 до 10 000 $м^3$/ч с относительной погрешностью измерений

±2…3 %. Из-за большого интервала рабочих расходов данные счетчики получили наибольшее распространение.

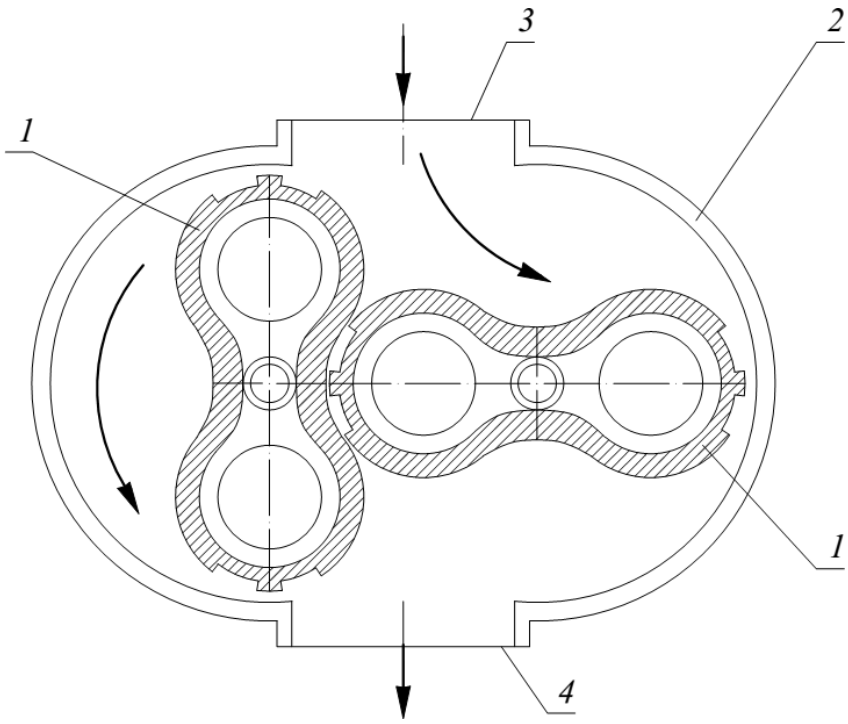


Рис. 3.5. Принципиальная схема ротационного счетчика газа: *1* – роторы; *2* – кожух;
3 – входной патрубок; *4* – выходной патрубок

3.5 Расходомеры переменного перепада давления

Работа расходомеров переменного перепада давления основана на изменении потенциальной энергии (статического давления) вещества, протекающего через сужающее устройство. В качестве сужающего устройства применяются диафрагмы, сопла, сопла с трубой Вентури.

Принципиальная схема работы расходомера переменного перепада давления с диафрагмой приведена на рис. 3.6, *а* [24]. Сужение потока начинается до диафрагмы в сечении I-I, и по достижении некоторого расстояния после неё в сечении II-II достигает максимального значения, вызванного силами инерции. Вблизи диафрагмы образуются зоны завихрений.

Давление потока около стенки трубопровода составляет максимальное значение p_1, Па, за счет подпора перед диафрагмой. Минимальное давление p'_2 возникает в наиболее узком сечении потока II-II. По мере удаления от стенок диафрагмы давление увеличивается до

некоторой величины, которая будет меньше p_1 на величину потерь давления $p_п$, Па. В связи с тем, что по конструктивным соображениям измерение давлений проводится вблизи стенок диафрагмы, измеряемый перепад составляет $p'_1 - p'_2$ вместо $p_1 - p_2$.

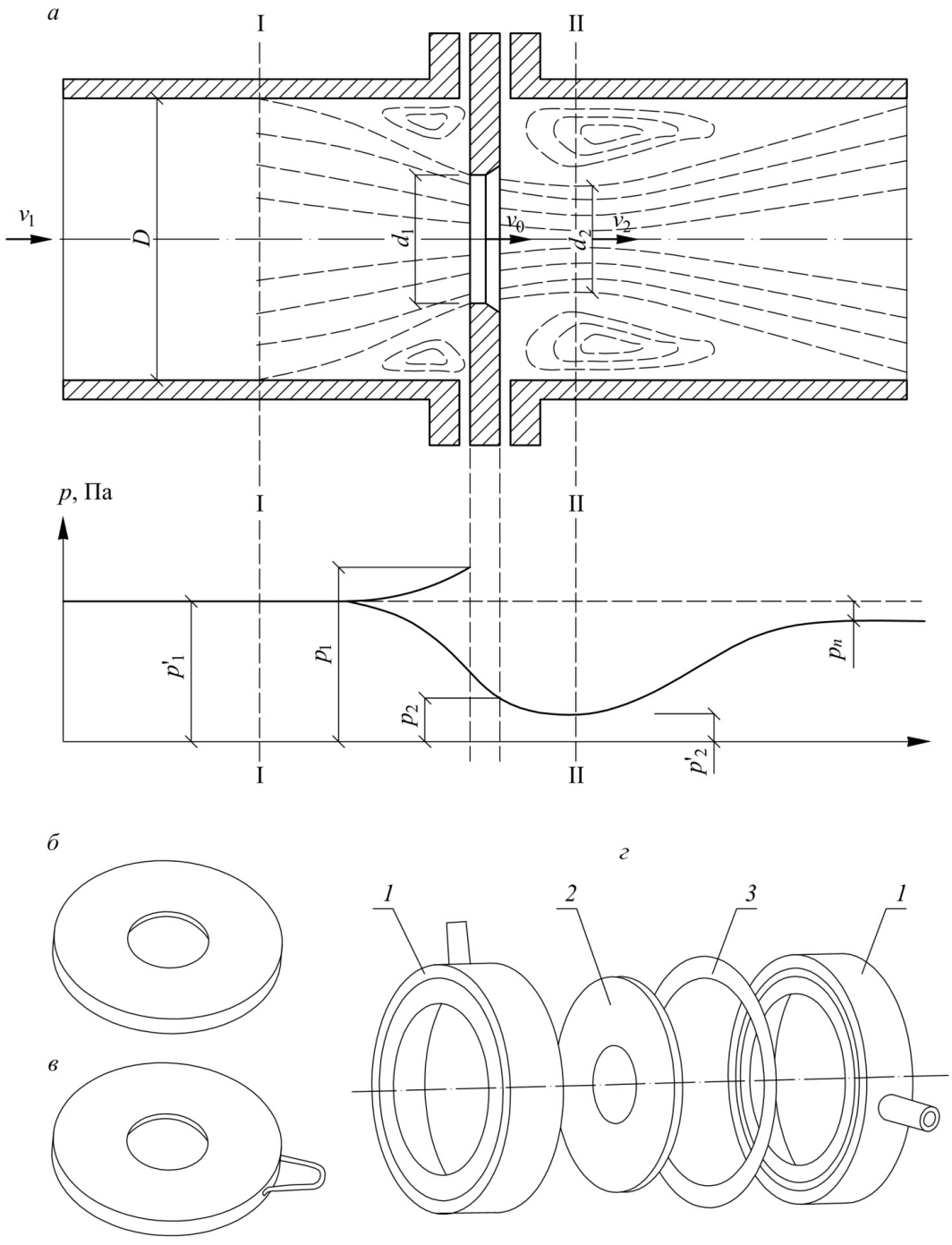


Рис. 3.6. Схема расходомера переменного перепада давления (*а* – изменение потока и давления при прохождении через сужающее устройство; *б* – камерная диафрагма; *в* – бескамерная диафрагма; *г* – конструкция камерной диафрагмы): *1* – кольцевые камеры; *2* – диск; *3* – уплотняющая прокладка

Для учета данного допущения вводится поправочный коэффициент, равный отношению рассмотренных перепадов давления $p'_1 - p'_2$ и $p_1 - p_2$.

Существуют различные конструкции сужающих устройств, однако наиболее распространенными являются диафрагмы [44]. Диафрагмы подразделяются на два типа: камерные (рис. 3.6, б, г) и бескамерные (рис. 3.6 в). Камерные диафрагмы изготавливаются условным диаметром от 50 до 500 мм, а бескамерные – от 300 до 1000 мм. Толщина диафрагмы не должна превышать 5 % от диаметра трубопровода. Диаметр отверстия не может быть меньше 12,5 мм. Конструкция диафрагмы должна соответствовать ГОСТ 8.586.2–2005. Отбор давлений проводится до и после диафрагмы в месте её сопряжения с каналом.

3.6 Расходомеры постоянного перепада давления

Наибольшее распространение среди расходомеров постоянного перепада давления получили ротаметры. Ротаметры – это расходомеры со свободно перемещающимся в корпусе поплавком.

Принцип работы ротаметра (рис. 3.7) заключается в следующем. Через коническую трубку *4* ротаметра снизу вверх проходит жидкость, которая поднимает поплавок *2* до тех пор, пока вес поплавка G_1, Н, не уравновесится сила- ми, действующими на него со стороны измеряемого потока G_2, Н.

Трубка ротаметра изготавливается из стекла при давлениях, не превышающих 600 кПа, при больших значениях применяются металлические трубки.

Ротаметр может быть оборудован электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний (рис. 3.8). Трубка *1* данных ротаметров оборудована диафрагмой *2*, внутри которой перемещается конусный поплавок *3*. Поплавок соединен со штоком *4*, на противоположном конце которого располагается сердечник *5* дифференциально-трансформаторного преобразователя. При перемещении

поплавка меняется положение сердечника, что приводит к изменению напряжения на катушках *7* преобразователя. Изменение напряжения преобразуется в цифровой сигнал во вторичном преобразователе и выводится на дисплей ротаметра.

Ротаметры измеряют расход при рабочих давлениях до 6,2 МПа с погрешностью измерения, не превышающей 3 % верхнего предела измерений.

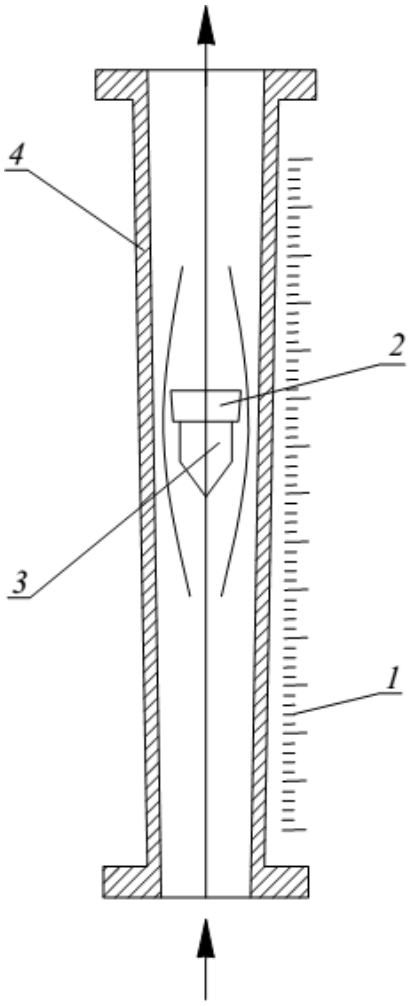


Рис. 3.7. Схема стеклянного ротаметра: *1* – шкала; *2* – поплавок; *3* – наконечник;*4* – коническая трубка

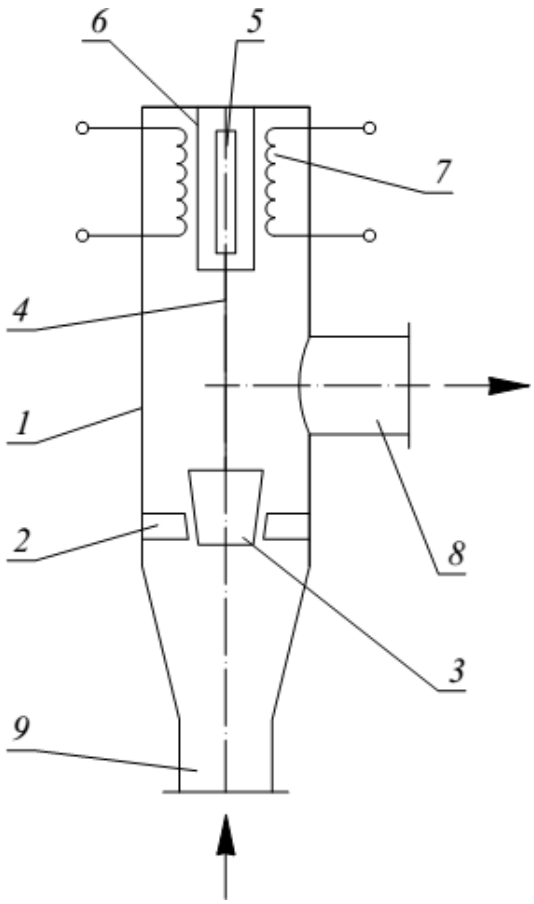


Рис. 3.8. Ротаметр, оборудованный электрической системой передачи показаний:*1* – трубка; *2* – диафрагма; *3* – поплавок;
4 – шток; *5* – сердечник; *6* – разделительная трубка; *7* – катушки; *8* – выходной патрубок;*9* – входной патрубок

3.7 Электромагнитные расходомеры

Электромагнитные расходомеры – это приборы для измерения расхода, принцип работы которых основан на взаимодействии движущейся жидкости с магнитным полем. Данный тип расходомеров является бесконтактным, в нем отсутствует прямой контакт измеряемой среды с чувствительным элементом.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера приведена на рис. 3.9. По трубопроводу *1* протекает жидкость, попадающая в электромагнитное поле, создаваемое полюсами *5*, *6* магнита (либо катушками индуктивности). В стенках трубопровода напротив друг друга установлены электроды *2*, *3*, образующие вместе с электропроводящей жидкостью и измерительным прибором *4* электрическую цепь.

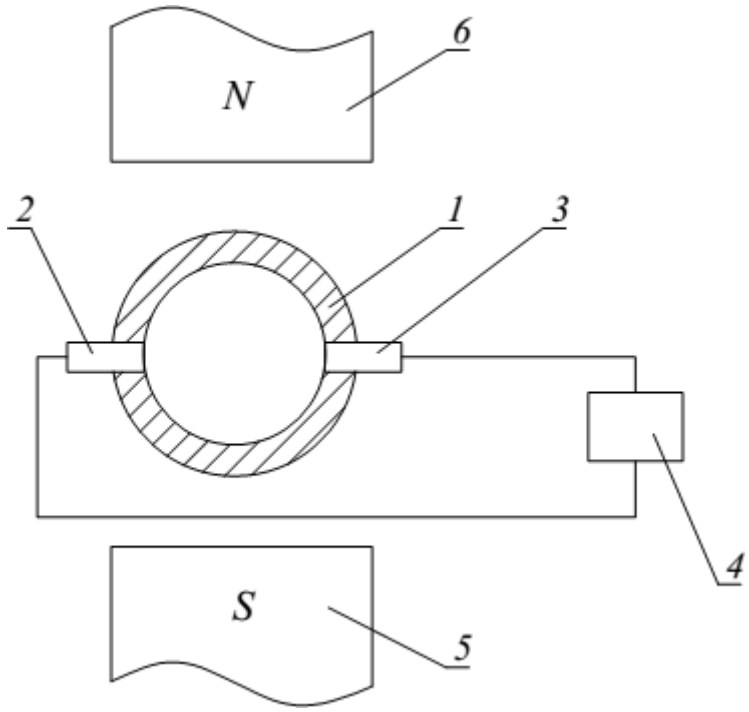


Рис. 3.9. Схема электромагнитного расходомера: *1* – трубопровод; *2*, *3* – электроды; – измерительный прибор; *5*, *6* – полюса магнита

При осесимметричном профиле скоростей в жидкости между электродами наводится ЭДС, которая прямо пропорциональна объемному расходу жидкости, расчет значений которого проводится во вторичном преобразователе, получающем сигналы от измерительного прибора.

Корпус расходомера изготавливается из материалов-диэлектриков, таких как фторопласт, резина, эбонит и др.

Использование электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем имеет известные недостатки: трудность усиления постоянного тока; возникновение на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации, что приводит к неверным результатам измерения. В связи с этим распространение получили электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем.

На точность измерений электромагнитных расходомеров с переменным магнитным полем влияют паразитные помехи от внешних цепей, емкостные от переменного тока, питающего магнит, и индукционные от магнитного поля пре образователя. Данные помехи исключаются путем экранирования прибора и применения двух индукционных преобразователей с магнитными полями, направленными в противоположном направлении.

Электромагнитные расходомеры используются для измерений расходов в интервале от 0,002 до 300 000 $м^3$/ч в трубопроводах от 3 до 3000 мм. Широкий диапазон измерений обусловлен безынерционностью данных расходомеров. Результаты измерений не зависят от физических свойств среды, наличия взвешенных частиц и пузырьков газа.

3.8 Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые расходомеры – это приборы для определения расхода, их принцип работы основан на явлении смещения звукового колебания движущейся жидкой или газообразной средой.

Расход определяется путем косвенных измерений разности времени прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него (времяимпульсный метод), по разности фаз между ультразвуковыми колебаниями, распространяющимися по потоку и против него (фазовый метод), и по разности частот двух автогенераторов, в качестве элемента обратной связи которых используется контролируемая среда (частотный метод).

Рассмотрим принцип работы наиболее распространенных ультразвуковых расходомеров, работающих по времяимпульсному методу (рис. 3.10).

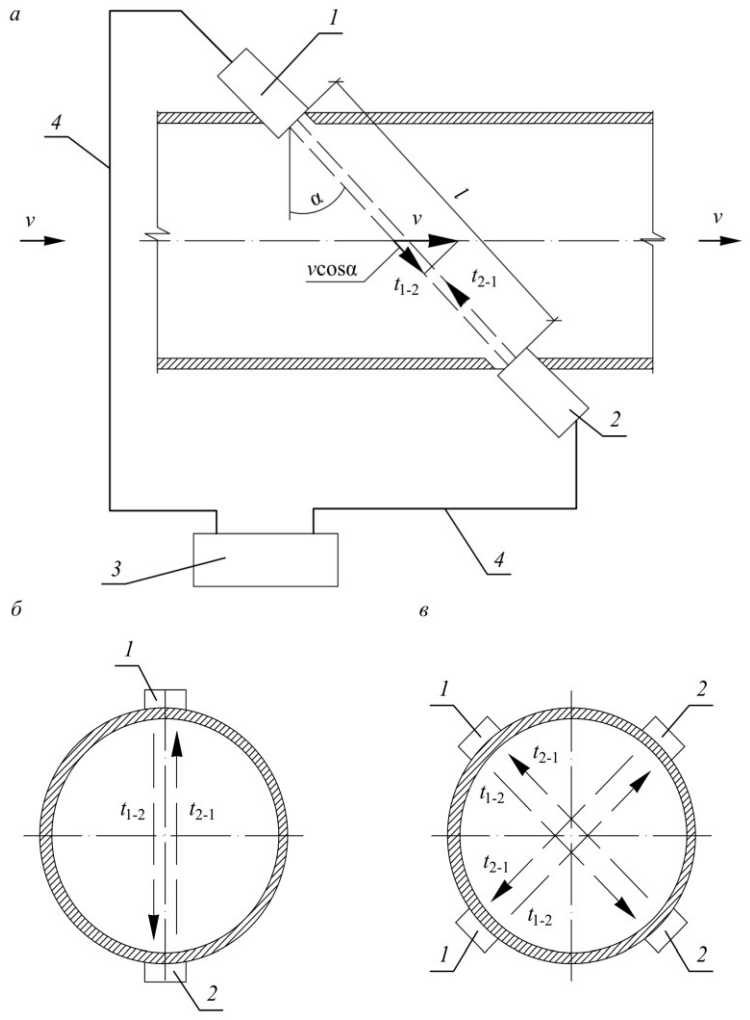


Рис. 3.10. Ультразвуковой расходомер (*а* – принципиальная схема; *б* – поперечное сечение расходомера с двумя преобразователями; *в* – то же с четырьмя преобразователями): *1*, *2* – электроакустические преобразователи; *3* – вторичный преобразователь; *4* – кабели

Ультразвуковой сигнал, излучаемый электроакустическим приемо-передающим преобразователем *1*, проходит через движущуюся по трубе жидкость и воспринимается преобразователем *2*. Преобразователи ультразвукового сигналаустанавливают под углом $\alpha = 20…70°$.

При движении жидкости происходит снос ультразвуковой волны, который приводит к изменению времени распространения ультразвукового сигнала. При движении сигнала по потоку жидкости время прохождения сигнала уменьшается, а при движении против потока жидкости – увеличивается.

Значения объемного расхода определяются по результатам расчетов во вторичном преобразователе *3*, соединенном с преобразователями кабелем *4*.

Ультразвуковые расходомеры предназначены для измерений расходов любых веществ, не имеющих твердых и газовых включений. Точность измерений не зависит от физических свойств измеряемой среды.

3.9 Расходомеры Кориолиса

Расходомеры Кориолиса – это приборы для измерения расхода вещества. Их принцип работы основан на использовании сил инерции. Данные расходомеры получили свое название в честь французского математика Гюстава Кориолиса, доказавшего, что следует учитывать силу инерции при описании движения тел во вращающейся системе координат.

Принципиальная схема работы расходомера Кориолиса приведена на рис. 3.11. Сенсорные трубки *1* расходомера, имеющие изогнутую форму, приварены к корпусу *4*, соединенному с трубопроводом фланцами *5*. Вещество, расход которого измеряется, поступает в измерительные трубки в равных долях. Трубки колеблются в противоположном направлении с определенной частотой под воздействием задающей катушки *6*. На входе и

выходе установлены детекторы скорости *2*, определяющие положение трубок относительно другдруга.

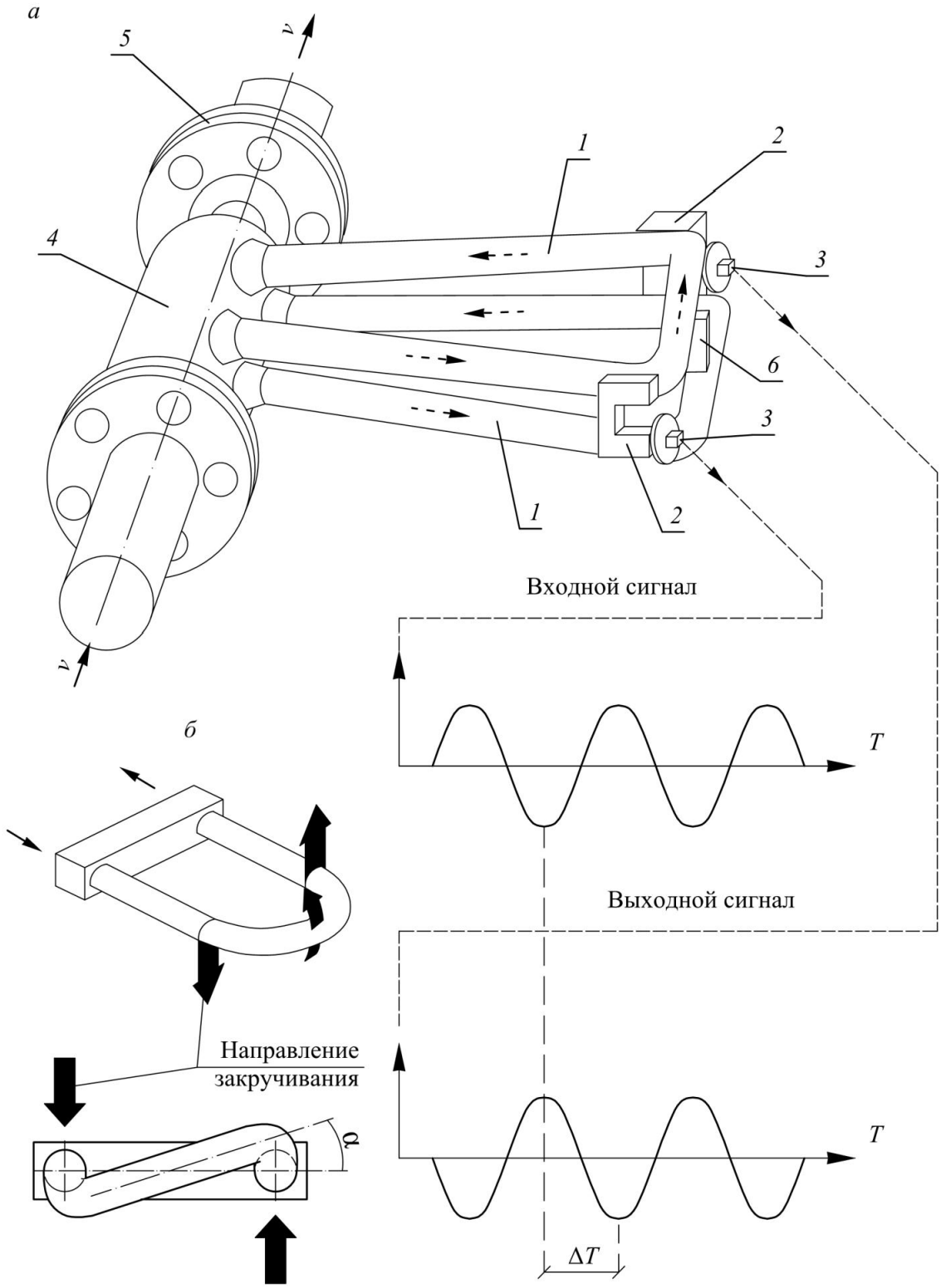


Рис. 3.11. Принципиальная схема работы расходомера Кориолиса (*а* – конструкция;*б* – направления изгиба): *1* – сенсорные трубки; *2* – магниты; *3* – катушки-соленоиды;*4* – корпус; *5* – фланцевое соединение; *6* – задающая катушка

Детекторы скорости представляют собой сборки магнитов *2* и катушек- соленоидов *3*, смонтированных на разных трубках. Каждая катушка движется в однородном магнитном поле магнита. В результате генерируется напряжение в форме синусоидальной волны (рис. 3.11, *а*). Движение жидкости в колеблющейся трубке при первой половине цикла колебания приводит к сопротивлению её изгибанию вниз, а при обратном течении после поворота во второй половине цикла колебания, напротив, способствует её изгибу вверх. Движение жидкости через вибрирующую трубку приводит к её закручиванию (рис. 3.11, *б*). В этом и проявляется эффект Кориолиса. Угол закручивания трубки α прямо пропорционален расходу жидкости, проходящей через трубку.

При движении жидкости через трубки синусоидальный сигнал от катушек-соленоидов на входе будет запаздывать по сравнению с сигналом на выходе на величину времени ΔT, с, пропорциональную массовому расходу. Чем больше величина ΔT, тем больше массовый расход.

Расходомеры Кориолиса предназначены для измерения расходов жидкостей и газов в трубопроводах диаметром от 3 до 150 мм. Класс точности данных приборов от 0,5 до 1,5.

3.10 Вихревые расходомеры

Вихревые расходомеры – это устройства, предназначенные для определения расхода веществ, принцип работы которых основан на эффекте Кармана (эффекте вихревой дорожки). Эффект Кармана заключается в том, что при обтекании твердого тела потоком жидкости за ним образуется вихревая дорожка из вихрей, которые поочередно срываются с противоположных сторон тела. Частота образования вихрей пропорциональна скорости движения потока.

Принципиальная схема вихревого расходомера приведена на рис. 3.12 [43]. По направлению движения жидкости устанавливается тело обтекания *1*, за которым располагаются датчики пульсации давления *2*.

Перед телом обтекания установлен тензорезисторный преобразователь избыточного давления *3*. Внутри тела обтекания размещен датчик температуры (термопреобразователь сопротивления) *4*. Для доступа жидкости к датчику температуры в теле обтекания предусмотрено отверстие *5*. Полученные от датчиков сигналы передаются к вторичному преобразователю *6*, а оттуда к вычислителю, в котором по полученным данным проводится расчет расхода жидкости.

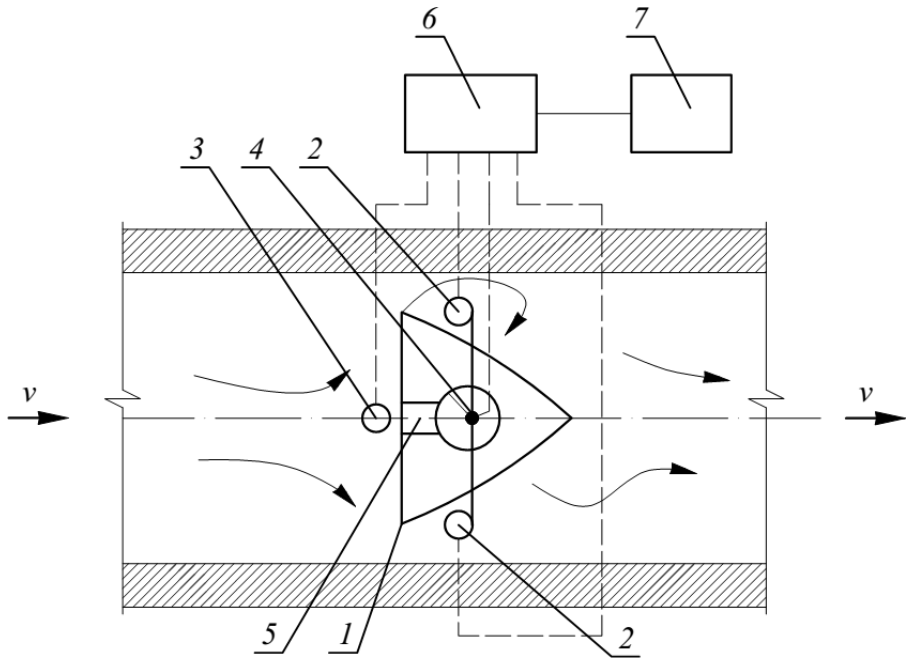


Рис. 3.12. Схема вихревого расходомера: *1* – тело обтекания; *2* – датчик пульсации давления; *3* – датчик избыточного давления; *4* – датчик температуры; *5* – входное отверстие; *6* – вторичный преобразователь; *7* – вычислитель

Частным случаем вихревых расходомеров является вихреакустический расходомер, схема которого приведена на рис. 3.13. В качестве тела обтекания принята трапецеидальная призма *1*. Детектирование вихрей осуществляется ультразвуковыми преобразователями, расположенными за телом обтекания. Ультразвуковые колебания поступают из пьезоизлучателя *3* к пьезоприемнику *4*, в результате взаимодействия с вихрями выходные и полученные сигналы колебаний становятся модулированными по фазе. В фазовом детекторе *5*

разность фаз колебаний преобразуется в напряжение, по частоте и амплитуде пропорциональное частоте и интенсивности следования вихрей. Выходной сигнал поступает в микропроцессор, в котором вычисляется расход жидкости.

Областью применения вихревых расходомеров является измерение расходов чистых жидкостей (не способствующих изменению формы тела обтекания) с низкой вязкостью, двигающихся со средней и высокой скоростью.

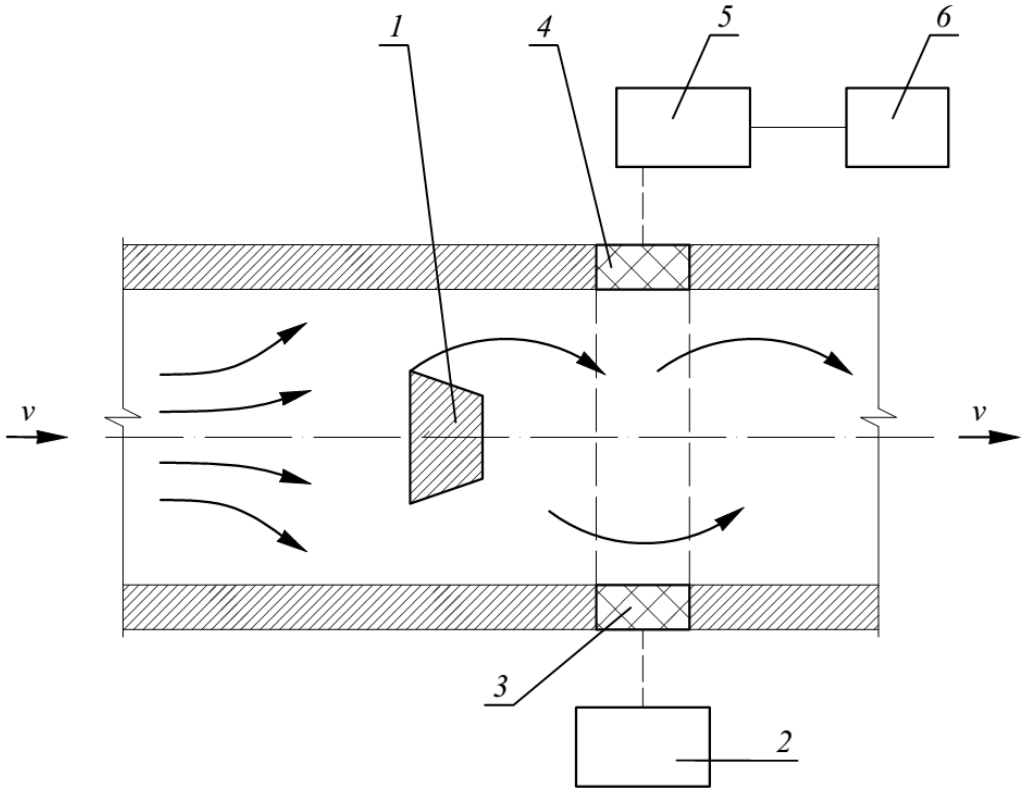


Рис. 3.13. Схема вихреакустического расходомера: *1* – тело обтекания; *2* – генератор; *3* – пьезоизлучатель; *4* – пьезоприемник; *5* – детектор; *6* – микропроцессор

3.11 Калориметрические и термоконвективные расходомеры

Работа калориметрических расходомеров основана на нагреве жидкости или газа внешним источником энергии и создании в результате этого разности температур, зависящей от скорости исследуемого потока.

Рассмотрим принципиальную схему работы калориметрического расходомера (рис. 3.14, *а*). Датчик расходомера представляет собой нагреватель *3* с двумя установленными до и после него датчиками температуры. Исследуемое вещество нагревается нагревателем *3*, величина мощности нагрева электронагревателя является постоянной и известной величиной. Приведенная схема позволяет сразу градуировать расходомер по разности температур теплоносителя.

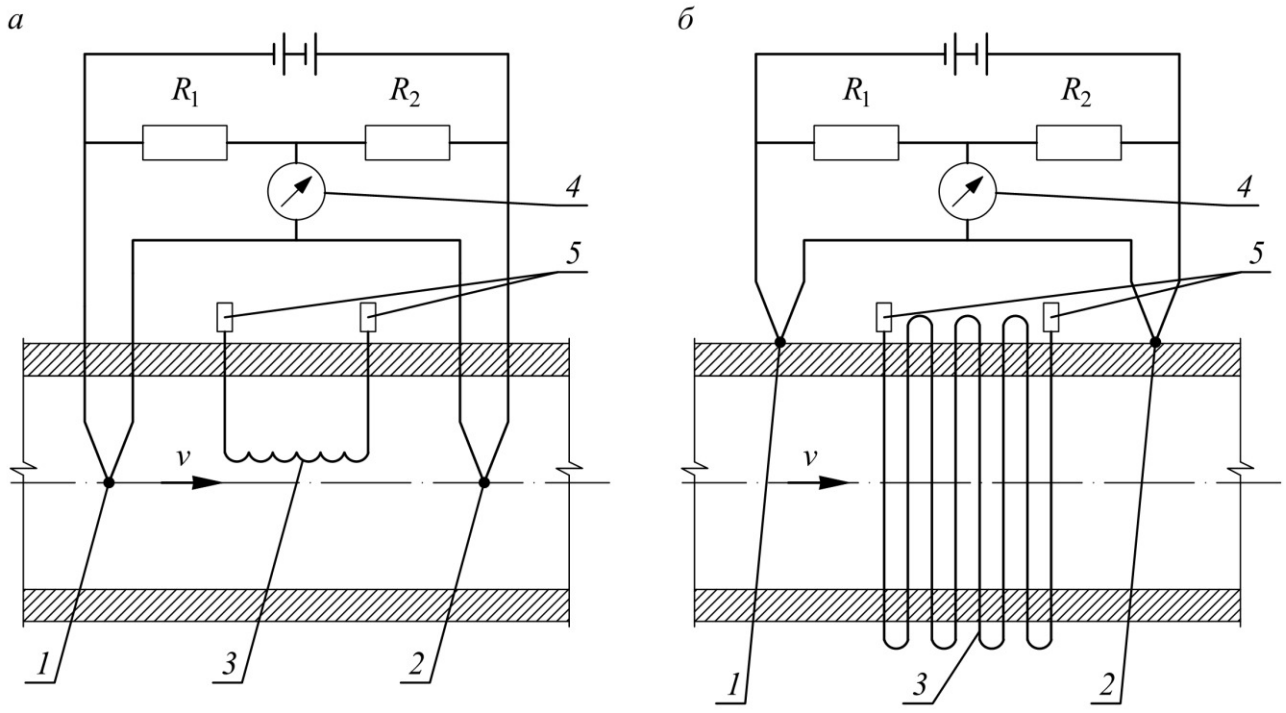


Рис. 3.14. Принципиальные схемы расходомеров (*а* – калориметрических; *б* – термоконвективных): *1*, *2* – термометры сопротивления; *3* – электрический нагреватель; *4* – измерительный прибор; *5* – источник электрической энергии

Относительная погрешность измерений калориметрическими расходомерами составляет примерно ±0,5…1 %.

Аналогичный принцип работы имеют термоконвективные расходомеры (рис. 3.14, б), отличающиеся тем, что датчики температуры и нагреватель находятся снаружи трубопровода. Отсутствие контакта со средой повышает надежность данных расходомеров при измерении расходов агрессивных веществ

Контрольные вопросы

1. Чем счетчики отличаются от расходомеров? Перечислите основные характеристики счетчиков.
2. Перечислите, на какие основные типы подразделяются счетчики и расходомеры по принципу их работы.
3. Запишите зависимость между массовым и объемным расходами.
4. В чем заключается принцип работы скоростных счетчиков расхода жидкости с винтовой вертушкой?
5. Опишите принцип работы барабанного расходомера. Для измерений расходов каких веществ предназначены данные расходомеры?
6. В какой зависимости друг от друга находятся коэффициенты расхода, скорости входа и истечения сужающего устройства расходомеров переменного перепада давления?
7. Приведите основные конструктивные элементы камерной диафрагмы.
8. Дайте описание электрической дифференциально-трансформаторной системы ротаметров, в чем заключается принцип её работы.
9. В чем преимущества и недостатки электромагнитных расходомеров спостоянным и переменным магнитным полем?
10. Напишите уравнение объемного расхода жидкости от ЭДС для электромагнитных расходомеров с переменным магнитным полем.
11. Конструкция и принцип работы ультразвуковых расходомеров.
12. Каким образом связаны друг с другом угол закручивания сенсорной трубки, запаздывание синусоидального сигнала катушек и измеряемого расходав расходомерах Кориолиса?
13. Перечислите основные конструктивные элементы вихревых и вихре-акустических расходомеров, в чем их сходства и отличия?
14. Чем отличаются друг от друга калориметрические и термоконвективные расходомеры? Какие из них имеют лучшую защиту от агрессивных сред?

15. Запишите уравнение для определения массового расхода калориметрическими и термоконвективными расходомерами.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Цель работы:

1. Изучить конструкцию и принципиальные схемы современных газоанализаторов.

2. Ознакомиться с измерительными приборами.

3. Произвести измерение давления, температуры и относительной влажности атмосферного воздуха.

4. Определить характеристики газовой среды.

Продолжительность занятия: 2 часа.

Оборудование, приборы, инструменты: газоанализатор.

4.1. Определение состава газов

Газоанализаторы – это измерительные приборы, применяемые в различных отраслях промышленности (включая тепловую энергетику) для анализа составов газов (в том числе воздуха).

Газоанализаторы, как правило, представляют собой сложные установки, имеющие в своей конструкции ряд устройств для отбора, подготовки и транспортирования проб газа через прибор.

Большинство газоанализаторов предназначено для измерения концентрации одного компонента в смеси газов. В зависимости от назначения газоанализаторы могут градуироваться в % по объему, г/м^3, мг/л и т.п.

В зависимости от положенных в основу измерения физико-химических свойств газоанализаторы делятся на механические, тепловые,

магнитные, оптические, электрические, хроматографические и масс-спектрометрические.

4.2 Объемные химические газоанализаторы

Объемные химические газоанализаторы являются наиболее распространенными приборами механического типа. Они предназначены для измерения концентрации в смеси газов диоксида углерода, сероводорода, диоксида серы, кислорода, оксида углерода, водорода, непредельных и предельных углеводородов и азота. О содержании измеряемого компонента судят по изменению объема газовой смеси в результате избирательного поглощения, каталитического окисления или сжигания определенного компонента. Для поглощения водорода и оксида углерода используется щелочной раствор полухлористой меди. Кислород поглощается щелочным раствором пирогаллола.

Принципиальная схема объемного химического газоанализатора, предназначенного для измерения двух компонентов газовой смеси CO_2 и O_2, приведена на рис. 4.1 [16]. Прибор состоит из измерительной бюретки *1*, соединенной с гребенкой *2*, к которой подключаются два поглотительных сосуда *3*, *4*. Сосуд *3* заполнен раствором едкого калия и используется для поглощения CO_2, сосуд *4* содержит щелочной раствор пирогаллола для поглощения O_2.

Так как второй раствор поглощает CO_2, в процессе замеров в первую очередь определяют именно содержание CO_2 и только потом кислорода. Внутри мерной бюретки находится сообщающаяся с атмосферой трубка *5*, которая используется для контроля давления пробы газа после поглощения определяемого компонента. Отбор пробы при открытом кране *9* и покачивание газа через прибор осуществляется резиновой грушей *6*.

Напорный сосуд *7* с запирающей жидкостью опущен, газ через трубку *5* выталкивается в атмосферу. При подъеме напорного сосуда *7* запирающая жидкость при достижении конца трубки *5* отсекает от

атмосферы пробу газа необходимого объема. В двух других положениях крана *8* проба газа в мерной бюретке *1* сообщается с сосудами *3*, *4*. Фильтр *10* служит для очистки газа.

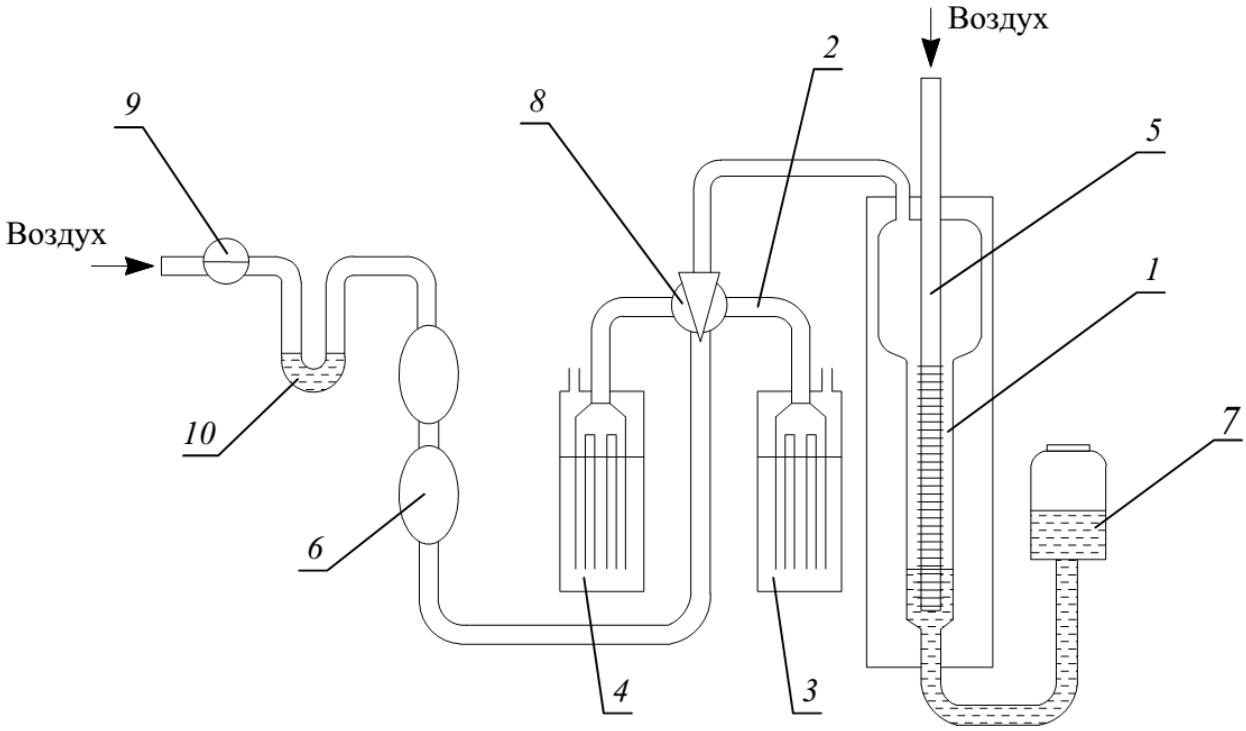


Рис. 4.1. Схема объемного химического газоанализатора ГХП-2: *1* – измерительная бюретка; *2* – гребенка; *3*, *4* – поглотительные сосуды; *5* – трубка; *6* – резиновая груша; *7* – напорный сосуд; *8*, *9* – краны; *10* – фильтр

В качестве запирающей используется жидкость, не поглощающая компоненты анализируемой газовой смеси. Для этого применяются насыщенные растворы поваренной соли или хлористого кальция.

Преимуществами данной методики измерения является возможность измерения широкого круга компонентов газовых смесей, анализа многокомпонентных газовых смесей и простота устройства прибора.

Недостатками метода являются низкая точность результатов анализа, периодичность действия, необходимость частой замены реактивов и сложность создания автоматических приборов.

4.3Термокондуктометрические газоанализаторы

Термокондуктометрические газоанализаторы – это приборы для анализа состава газовых смесей путем измерения их теплопроводности.

Термокондуктометрические газоанализаторы относятся к группе тепловых газоанализаторов, к которым также относятся термохимические. Для измерения теплопроводности газовой смеси используется нагреваемый током проводник, помещенный в камеру, заполненную анализируемой смесью.

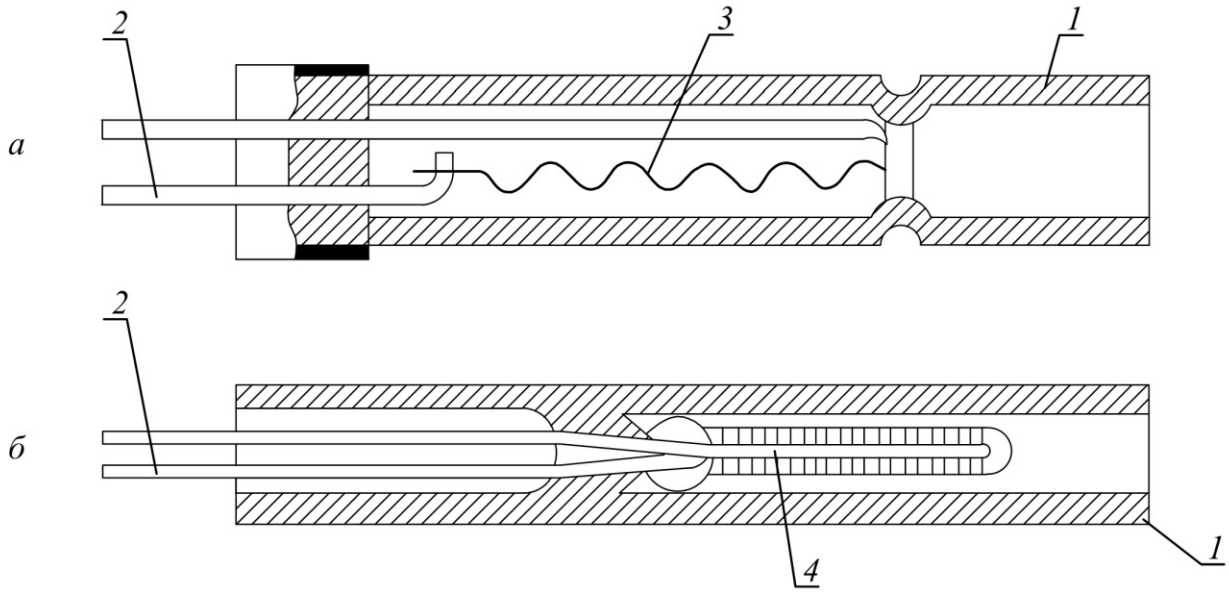


Рис. 4.2. Схема чувствительного элемента термокондуктометрического газоанализатора (*а* – с открытой платиновой спиралью; *б* – с остеклованной платиновой спиралью): *1* – стеклянный корпус; *2* – платиновый токопровод; *3*, *4* – платиновые спирали.

При постоянных и известных значениях отдаваемой проводником теплоты Q и температуры стенок камеры t_c, зависящей от температуры окружающей среды, теплопроводность газовой смеси будет однозначно определять температуру проводника и как результат его сопротивление. В качестве проводника используют проволоку из металла с высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления и

химической стойкостью (платина, вольфрам, никель, тантал и др.). Схемы двух наиболее распространенных типов чувствительного элемента представлены на рис. 4.2. В стеклянном корпусе *1* к платиновым токоподводам *2* подпаяна платиновая спираль *3* открытая или остеклованная *4*. Чувствительный элемент второго типа защищен от агрессивных воз действий среды, однако имеет большую инерцию.

4.4 Магнитные газоанализаторы

Магнитные газоанализаторы – это приборы для анализа состава газов, в которых концентрация определяемого компонента измеряется по изменению магнитных свойств смеси, её магнитной восприимчивости.

Данные газоанализаторы применяют для определения содержания кислорода в объеме газовых смесей, т. к. он обладает наибольшей магнитной восприимчивостью, т. е. относится к парамагнитным газам. Магнитная восприимчивость кислорода зависит от давления и снижается с ростом температуры.

Наиболее распространенным методом измерения магнитной восприимчивости смеси газов является метод, основанный на термомагнитной конвекции. На рис. 4.3 [16] показана схема чувствительного элемента кислородомера и его размещение между полюсами магнита в преобразователе с внешней магнитной конвекцией. Чувствительный элемент представляет собой платиновую проволоку *1*, намотанную на стеклянный капилляр *2*, покрытую остеклением *3*. Концы спирали подпаяны к токовводам *4*. Кислородосодержащий газ, протекающий по трубке *7*, втягивается в магнитное поле и нагревается от резистора R_1, при этом его магнитная восприимчивость снижается. Холодный газ выталкивает нагретый, создавая поток магнитной конвекции, охлаждающий резистор R_1. Для обеспечения одинаковых условий теплоотдачи резистор R_2 размещен внутри немагнитного медного блока *6*.

К преимуществам магнитных газоанализаторов следует отнести отсутствие необходимости удаления неопределяемых компонентов газа.

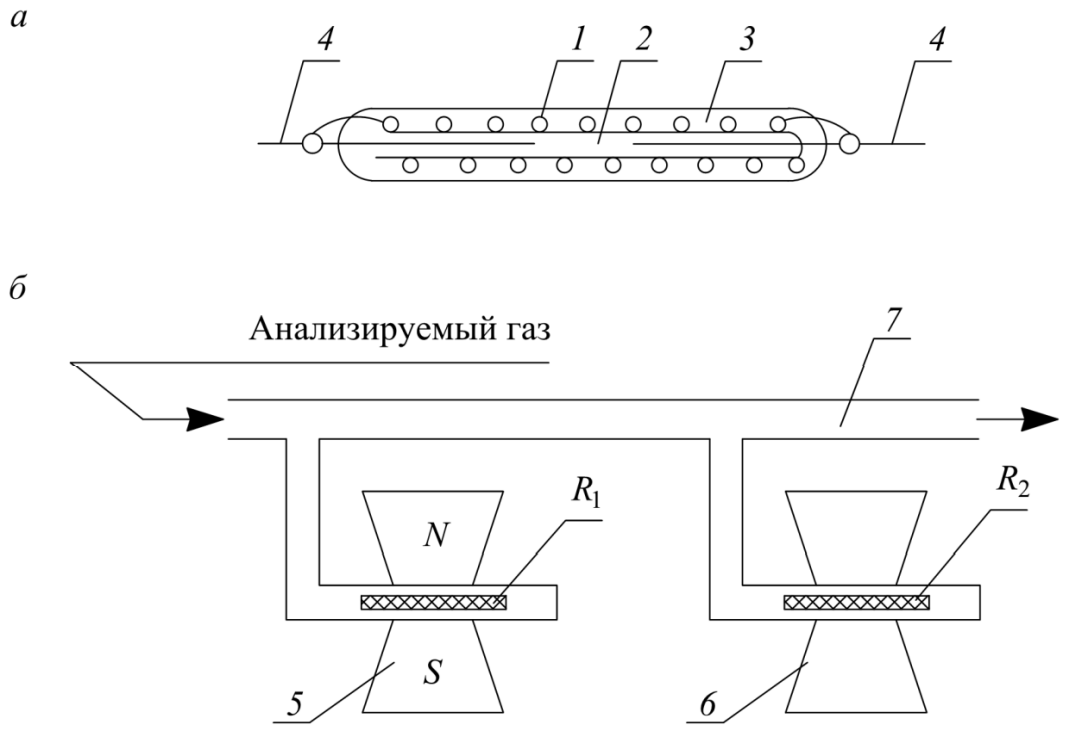


Рис. 4.3. Магнитный газоанализатор (*а* – схема чувствительного элемента; *б* – размещение чувствительного элемента между полюсами магнита в магнитном газоанализаторе): *1* – платиновая проволока; *2* – стеклянный капилляр; *3* – стеклянное покрытие; *4* – токоввод;*5* – магнит; *6* – медный блок; *7* – труба

4.5 Оптические газоанализаторы

Оптические газоанализаторы – это измерительные приборы, в которых концентрация определяемого компонента находится путем измерения оптических свойств газовой смеси. К основным свойствам относятся показатели преломления, спектрального поглощения и излучения, спектральная плотность и пр.

Оптические газоанализаторы по принципу действия классифицируются на приборы: инфракрасного и ультрафиолетового поглощения; фотоколоримет рические; люминесцентные; ослабления видимого излучения.

Для применения данного метода необходимо, чтобы определяемый компонент имел спектр поглощения, отличающийся от спектров поглощения других компонентов исследуемой газовой смеси.

Принципиальная схема оптико-акустического приемника инфракрасного излучения представлена на рис. 4.4 [16].

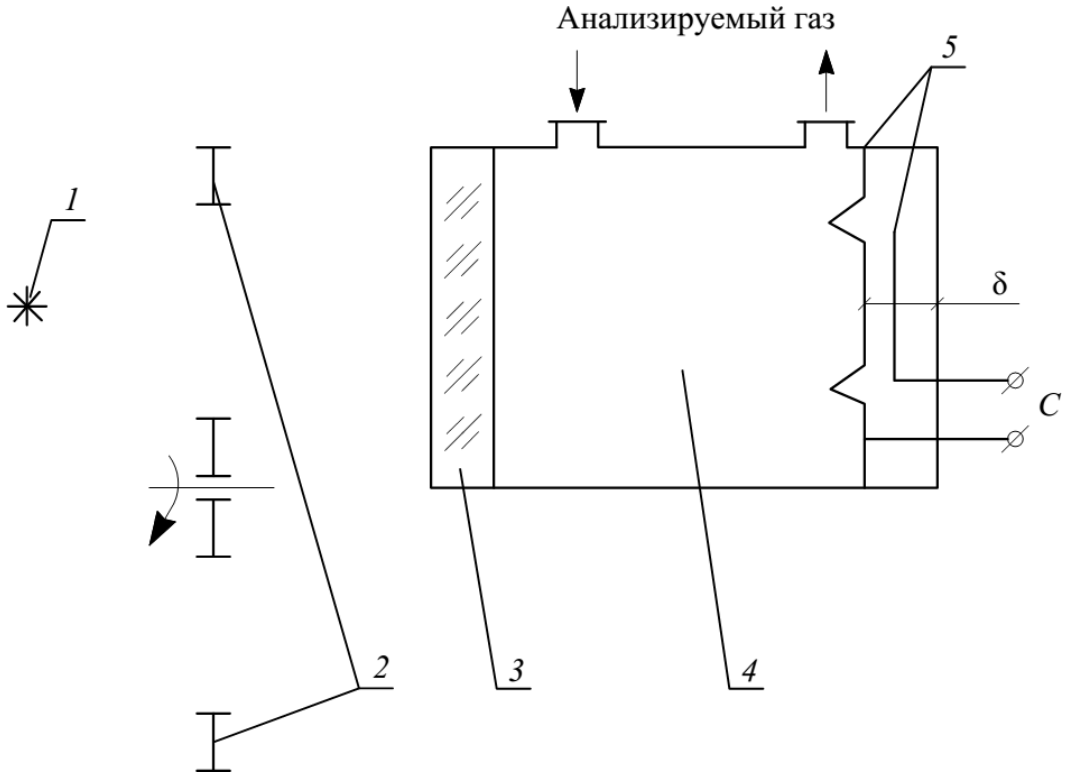


Рис. 4.4. Схема оптико-акустического лучеприемника: *1* – источник постоянного излучения; *2* – обтюратор; *3* – светофильтр; *4* – камера; *5* – чувствительный элемент

Источником 1 создается постоянное излучение, которое с помощью вращающегося диска с отверстиями (обтюратора) 2 и светофильтром 3 преобразуется в пульсирующее монохроматическое излучение. Анализируемый компонент, находящийся в камере 4, поглощает излучение, при этом в камере возникают пульсации температуры и, как следствие, давления. Пульсации давления воспринимаются микрофонным чувствительным элементом 5, являющимся конденсатором, образованным подвижной мембраной и неподвижной пластиной. Под действием давления мембрана перемещается, вызывая из-за колебаний зазора δ, мм, изменение

емкости конденсатора С. Данные об изменении емкости передаются на вторичный преобразователь, на котором отображается концентрация компонента смеси.

4.6 Электрические газоанализаторы

Электрические газоанализаторы – это приборы для измерения концентрации компонента газовой смеси в зависимости от изменения её электрических свойств в результате реакции с определяемым компонентом.

Электрические газоанализаторы подразделяются на амперометрические, кулонометрические и электрохимические.

В **амперометрических газоанализаторах** используется фоновый растворэлектролита с погруженными в нем двумя электродами, на которых создается разность напряжений U, В. Состав электролита и материал электродов подбирается так, чтобы при отсутствии в электролите определяемого компонента газа происходила поляризация только одного электрода и ток в цепи отсутствовал ($I \approx 0$). При введении определяемого компонента на поверхности поляризованного электрода протекают электрохимические реакции. В растворе возникает электрический ток, который находится в функциональной зависимости от концентрации определяемого компонента: чем выше концентрация компонента и больше площадь электрода, тем больше ток I. Зависимость тока I от напряжения U называется поляризационной кривой, которая характеризует концентрацию определяемого компонента газовой смеси.

Принцип работы **кулонометрического газоанализатора** основан на измерении количества электроэнергии, израсходованной при электролизе количества вещества m, г.

Работа **электрохимических газоанализаторов** основана на измерении тока между электродами в электрохимической ячейке, заполненной электролитом. Анализируемый газ вступает в химическое

взаимодействие с электролитом, в результате из электролита выделится какой-либо элемент.

4.7 Хроматографические газоанализаторы

Хроматографические газоанализаторы – это приборы, предназначенные для анализа многокомпонентных газовых смесей. Измерение состава смеси проводится путем разделения его на отдельные компоненты за счет различной скорости движения газов вдоль слоя сорбента, зависящей от характера внешнихи внутренних межмолекулярных взаимодействий.

Принципиальная схема хроматографического газоанализатора приведена на рис. 4.5 [28, 29]. Газ-носитель поступает из баллона *1* в детектор *3*. Постоянный расход газа поддерживается регулятором *2*. Проба анализируемого газа вносится в газ-носитель с помощью дозатора *4*. В разделительной колонке *5* происходит разделение смеси на компоненты А, Б и В, каждый из которых образует бинарную смесь с газом-носителем. Бинарные смеси исследуются по отдельности в детекторе. Результаты отображаются на дисплее *8* и ленте регистратора *9*.

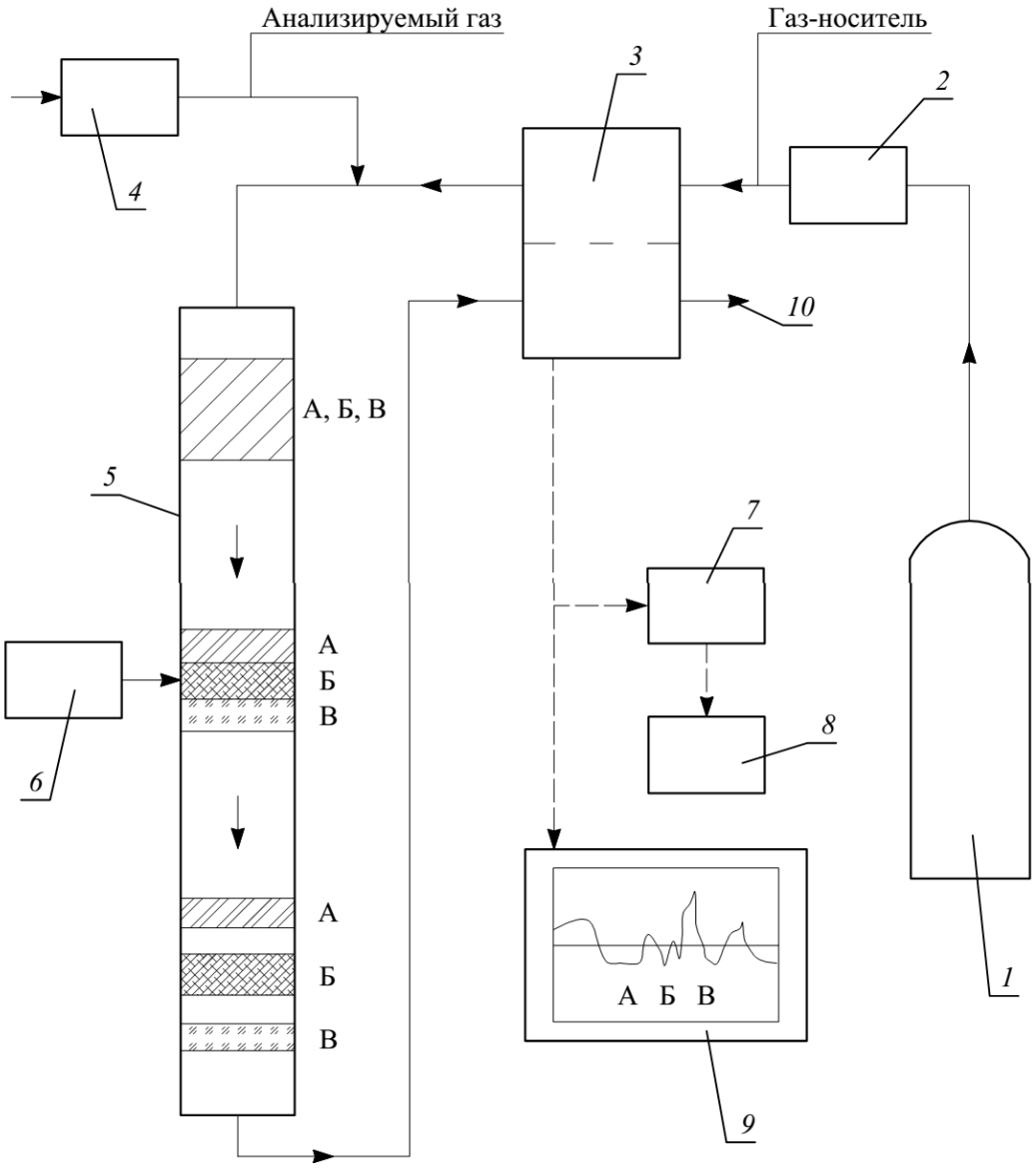


Рис. 4.5. Схема работы хроматографического газоанализатора: *1* – баллон; *2* – регулятор; *3* – детектор; *4* – дозатор; *5* – разделительная колонка; *6* – терморегулятор; *7* – микропроцессор; *8* – дисплей; *9* – регистрирующий прибор; *10* – сброс

Хроматографическое разделение является сложным процессом, связанным с сорбцией, десорбцией и диффузией. Диффузия может снизить качество процесса разделения. Для улучшения разделения компонентов в колонке *5* предусмотрен терморегулятор *6*.

К основным показателям эффективности процесса хроматографического разделения следует отнести следующие [16]:

1. Время удерживания компонента газа $t_к$, с, – интервал времени

между вводом пробы газа в детектор (хроматограф) и моментом определения максимальной концентрации данного компонента.

2. Удерживаемый компонентом объем газаносителя $V_к$, м^3, – это объем газаносителя, равный произведению объемной скорости газаносителя v, м^3/с на $t_к$.

3. Эффективность N хроматографической колонки.

4.18 Масс-спектрометрические газоанализаторы

Принцип работы масс-спектрометрических газоанализаторов основан на ионизации анализируемого газа и разделении ионов на пучки по компонентам, отличающимся соотношением массы иона к его заряду.

В зависимости от способа разделения ионов масс-спектрометрические газоанализаторы подразделяются на магнитные, в которых разделение ионов происходит в магнитном поле; времяпролетные с разделением ионов по времени их пролета от источника до коллектора ионов; радиочастотные – разделение ионов происходит под воздействием высокочастотных электрических полей.

Рассмотрим схему работы масс-спектрометра с разделением ионов в однородном магнитном поле (рис. 4.6 [41]). Исследуемый газ направляется в вакуумную камеру *4*. Катодом *1* испускает электроны, что приводит к образованию ионов, которые при помощи фокусирующей системы 3 направляются в магнитное поле электромагнита *5*. Ионы разных компонентов, обладающие отличной массой m_i, под действием магнитного поля разделяются на отдельные пучки, описывающие траектории с различными радиусами r_i, м

В результате изменения магнитной индукции или ускоряющего напряжения пучки ионов с одинаковой массой направляются к коллектору ионного тока *6*, напряжение которого через усилитель 7 подается на регистратор *8*.

Запись показаний регистратора имеет вид кривой с характерными пиками, соответствующими ионам с определенной массой. Высота отдельных пиков пропорциональна ионному току, проходящему через активное сопротивление, и характеризует концентрацию компонентов в газовой смеси.

Во времяпролетных масс-спектрометрах ионы приобретают разную скорость и разделяются на отдельные пучки, создающие импульсы тока, соответствующие отдельным компонентам анализируемого вещества.

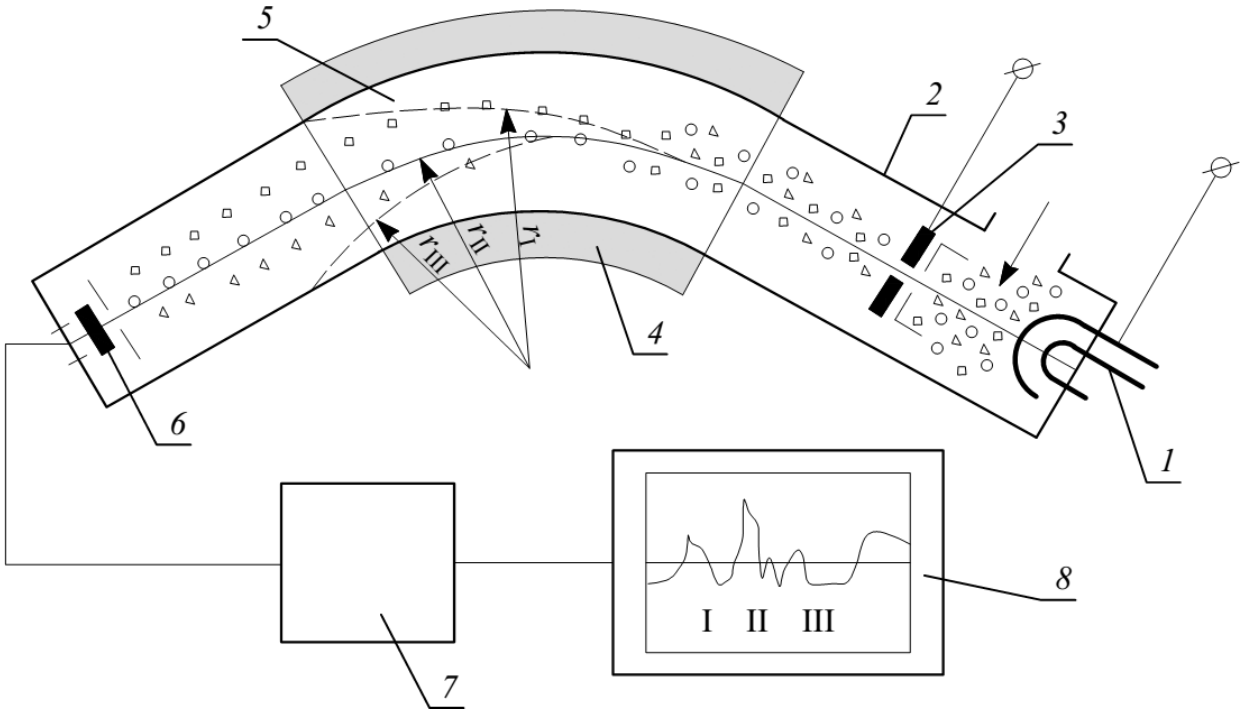


Рис. 4.6. Схема масс-спектрометрического газоанализатора: *1* – катод; *2* – корпус; *3* – фокусирующая система; *4* – магнит; *5* – вакуумная камера; *6* – коллектор ионного тока; *7* – усилитель сигнала; *8* – регистратор.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные единицы измерений влажности воздуха и материалов. Как они определяются?
2. Опишите конструкцию и принципы работы весового, волосяного и пленочного гигрометров.
3. Психрометр Ассмана. Конструкция, принцип работы, порядок расчетаотносительной влажности воздуха по результатам измерений.
4. Конденсационный гигрометр Крова.
5. Что такое газоанализатор? Приведите классификацию газоанализаторов в зависимости от физико-химических свойств, положенных в основу принципов их работы.
6. Опишите принцип работы и конструкцию объемных химических газоанализаторов. Перечислите их основные преимущества и недостатки.
7. На чем основан принцип работы термокондуктометрических газоанализаторов? С какой целью проводят остекление платиновой спирали их чувствительного элемента?
8. Принцип работы магнитных газоанализаторов.
9. Опишите принцип работы и конструкцию оптико-акустического приемника оптического газоанализатора.
10. Перечислите, на какие типы подразделяются электрические газоанализаторы по принципу их работы.
11. Опишите конструкцию хроматографических газоанализаторов. Какие показатели характеризуют эффективность проведения хроматографического разделения в разделительной колонке?
12. В чем заключается работа масс-спектрометрического газоанализатора с разделением ионов в магнитном поле?

Лабораторная работа № 5

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Цель работы:

Изучение наиболее распространенных методов и приборов для измерений температуры.

Продолжительность занятия: 2 часа.

Оборудование, приборы, инструменты:

- магазины сопротивлений - 2 шт.;
- резисторы (*r=100 Ом*) - 2 шт.;
- микроамперметр - 1 шт.;
- милливольтметр (*0…50…3000 мВ*) - 1 шт.;
- прибор постоянного тока (*mV*, *mA*) типа М1109 - 2 шт.;
- прибор постоянного тока (*mV*, *mA*) типа М1104 - 2 шт.;
- реостат на *100 Ом* - 1 шт.;
- термометр сопротивления типа ТСМ или ТСП - 1 шт.;
- термопара ТХА или ТХК - 1 шт.

5.1. Краткие теоретические сведения

Диапазон температур, подлежащих измерениям в различных отраслях науки и производства, очень широк. В нашей стране установлены практические температурные шкалы, предназначенные для обеспечения единства измерений температуры от *0,01* до *100000 К*, и методы их осуществления (*ГОСТ 8.157-75*).

Единицей температуры является Кельвин (*К*), вместо прежнего наименования градус Кельвина. Допускается применение единицы температуры – градус Цельсия (^0C).

Для измерений температуры все чаще всего применяются электрические методы. Они позволяют быстро и точно измерять температуру даже в тех точках, где применение неэлектрических методов невозможно или затруднено, например, для измерений температуры зерна в зернохранилищах, в различных точках электрогенератора и др. Для преобразования температуры в электрический сигнал применяют различные первичные преобразователи; наиболее часто применяют термометры сопротивления и термопары.

Стандартные термометры сопротивления (ТС) применяют для измерений температур в диапазоне от – *260* до 750^0C (кратковременно до *1100* ^0C). Их действие основано на свойстве веществ изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. В качестве материала для изготовления термометров сопротивления используют металлы (медь, платина, никель) или полупроводники. Зависимость сопротивления металла от температуры (рисунок 5.1) достаточно точно можно выразить формулой

$$R_T = R_0\left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2\right], \qquad (5.1)$$

где R_0 – номинальное сопротивление термометра при температуре T_0, обычно $T_0 = 0\ ^0C$;

α и β – температурные коэффициенты.

Промышленностью выпускаются ТС с номинальным сопротивлением *1,5, 10, 46, 50, 53, 100* и *500 Ом*. Для медных термометров сопротивления (тип ТСМ) обычно принимают $\alpha = 4{,}26\cdot10^{-3}\ K^{-1}$, $\beta = 0$. Для платиновых термометров сопротивления (тип ТСП) – $\alpha = 3{,}9685\cdot10^{-3}$, $\beta = -5{,}847\cdot10^{-7}K^{-2}$. Никелевые ТС в нашей стране серийно не выпускаются.

ТСМ применяют для измерения температур от - *50* до *+180* ^0C, а ТСП от - *260* до *+750* ^0C.

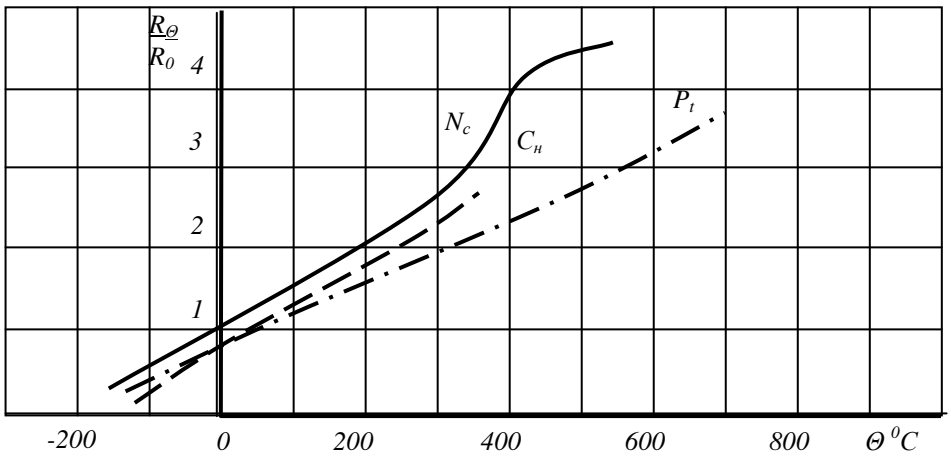


Рисунок 5.1 – Зависимость R_Θ/R_0 от температуры Θ для меди, платины и никеля

Таким образом, диапазон измеряемых температур для ТСП значительно шире, чем для ТСМ, поэтому в формуле (5.1) при расчетах учитывают как α, так и β. Иногда применяют и более точные формулы. По ним рассчитывают специальные градуировочные таблицы (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Градуировочная таблица термометров сопротивления

$\Theta,^0C$	Сопротивление термометра, Ом			
	Платинового		медного	
	град.21 R_0=46 Ом	град.22 R_0=100 Ом	град.23 R_0=53 Ом	град.53 R_0=100 Ом
-50	36,80	80,00	41,71	78,70
0	46,00	100,00	53,00	100,00
10	47,82	103,00	55,26	104,00
20	49,64	107,00	57,52	108,00
30	51,45	111,85	59,77	112,78
40	53,26	119,78	62,03	117,04
50	55,06	119,70	64,29	121,30
60	56,86	123,60	66,55	125,56
70	58,65	127,49	68,81	129,82
80	60,43	131,37	71,06	134,08
90	62,21	135,24	73,32	138,34
100	63,99	139,10	75,58	142,60
150	72,76	158,21	86,87	163,90

Полупроводниковые ТС подразделяют на термисторы и позисторы. Они обладают значительно большим температурным коэффициентом сопротивления α, причем у термисторов $\alpha < 0$. Габариты термисторов и позисторов обычно очень малы (от долей *мм* и более). Они малоинерционны, имеют большое номинальное сопротивление (от единицы до сотен *кОм*), дешевы. Но их характеристики менее стабильны, чем металлических ТС, разброс характеристик очень большой (нет взаимозаменяемости), все зависимости нелинейны, мощность рассеяния очень мала. Поэтому точность измерений температуры термистором невысока, а позисторы применяют только в устройствах температурной защиты.

Для измерений сопротивлений ТС используются вторичные приборы: мосты постоянного тока, мостовые схемы или логометры магнитоэлектрической системы.

Термопары. В цепи, состоящей из двух различных проводников, спаянных (или сваренных) одними концами (рисунок 8.2), при изменении температуры места спая по отношению к свободным концам появляется ЭДС. Такие преобразователи называют термопарами. Значение ЭДС термопары E_T (термоЭДС) определяется разностью температур

$$E_T = \alpha_T (T_1 - T_2), \qquad (5.2)$$

где T_1 – температура места спая;

T_2 – температура свободных концов;

α_T – температурный коэффициент материалов.

Наиболее часто применяются термопары типов ТПП (платинородий – платина), ТХА (хромель-алюмель) и ТХК (хромель-копель). ТермоЭДС термопар ТХА и ТХК приведены в таблице 5.2.

Для измерений термоЭДС в качестве вторичных приборов применяют показывающие, самопишущие и электронные милливольтметры, а также электронные потенциометры.

Показывающие и самопишущие милливольтметры – это приборы магнитоэлектрической системы, имеющие очень высокую чувствительность благодаря мощному постоянному магниту.

Таблица 5.2 – ТермоЭДС термопар ТХА и ТХК при температуре свободных концов $0\ ^0C$

Температ. Рабочего Конца, ^0C	ЭДС, *мВ*		Температ. рабочего конца, ^0C	ЭДС, *мВ*	
	ТХА	ТХК		ТХА	ТХК
0	0,00	0,00	-200	-5,75	-9,69
10	0,40	0,05	-100	-3,51	-5,74
20	0,80	1,31	0	0,00	0,00
30	1,20	1,98	100	4,10	6,88
40	1,61	2,66	200	8,13	14,59
50	2,02	3,35	300	12,21	22,88
60	2,43	4,05	400	16,40	31,49
70	2,85	4,76	500	20,65	40,28
80	3,26	5,48	800	33,32	66,47
90	3,68	6,18	1 000	41,32	-
100	4,10	6,88	1 200	48,87	-

Измеренное напряжение U меньше ЭДС термопары E_T на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении термопары:

$$U = E_T - I \cdot R_{вн} = E_T \cdot \frac{R_V}{R_{вн} + R_V}, \qquad (5.3)$$

где R_V – сопротивление вольтметра;

$R_{вн}$ – внутреннее сопротивление термопары.

Поэтому необходимо применять приборы с большим внутренним сопротивлением $R_V >> R_{вн}$ или вычислять E_T с учетом R_V и $R_{вн}$.

Если милливольтметр предназначен специально для измерений термоЭДС, то его шкалу градуируют в ^oC или К. Внутри такого прибора есть термокомпенсатор для компенсации температуры окружающей среды. Электронные и цифровые приборы имеют очень большое внутреннее

сопротивление, поэтому можно считать, что измеренное напряжение равно ЭДС.

Если термокомпенсатор (или термостат) не применяется, то измеренная ЭДС пропорциональна разности температур спаянных и свободных концов термопары.

5.2. Техника безопасности

При выполнении лабораторных работ следует соблюдать общие правила техники безопасности. Кроме того, следует соблюдать осторожность при обращении с нагревательными приборами.

5.3. Программа и методика выполнения работы

5.6.1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, применяемыми в работе, и записать их технические данные в таблицу 1в.

5.6.2. Рассчитать максимально допустимое значение напряжения, подаваемого на мостовую схему, исходя из того, что ток, протекающий через металлическое термосопротивление, не должен превышать *10 мА*.

5.6.3. Собрать электрическую цепь (рисунок 5.2). В качестве резисторов R_2 и R_4 взять магазины сопротивлений.

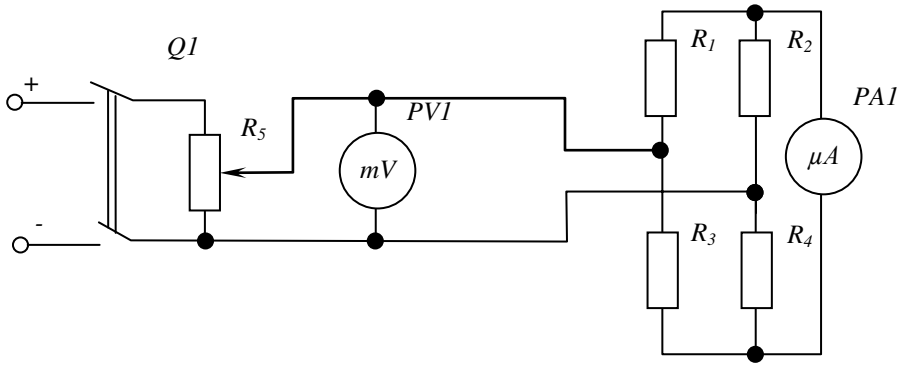


Рисунок 5.2 – Схема электрической цепи для измерений температуры с помощью термометра сопротивления источник питания.

5.6.4. Если $R_1 = R_3$, то на магазине сопротивлений R_2 установить $R_2 = R_0$. Если $R_1 \neq R_3$, то взять $R_2 = R_0 \cdot \frac{R_1}{R3}$, где R_0 – номинальное сопротивление датчика температуры (ТС).

5.6.5. На магазине сопротивлений R_4 установить $R_4 = R_2$ и включить

При этом подаваемое с реостата напряжение должно быть не более *1,0 В*. Убедиться в том, что мост уравновешен (стрелка микроамперметра должна показывать *0*).

5.6.6. Отключить источник питания и вместо магазина сопротивлений R_2 включить термометр сопротивления. Включить источник питания и записать показания микроамперметра α_T.

5.6.7. Включить нагревательное устройство и снять зависимость показаний прибора α от времени *t.* Температуру измерять до закипания воды. Следить, чтобы уровень воды был в пределах нормы. Результаты измерений записать в таблицу произвольной формы. Отключить ключ *Q1*, мостовую цепь разобрать.

5.6.8. Определить цену деления прибора *C* и его чувствительность *S*:

$$C = \frac{\Delta\Theta}{\Delta\alpha} = \frac{100}{\alpha_{100}}, \text{ град/дел}; \quad S = \frac{1}{C}, \text{ дел/рад},$$

где $\Delta\Theta$ – приращение температуры;

$\Delta\alpha = \alpha_{100}$ – показание прибора при $\Theta = 100^0 C$.

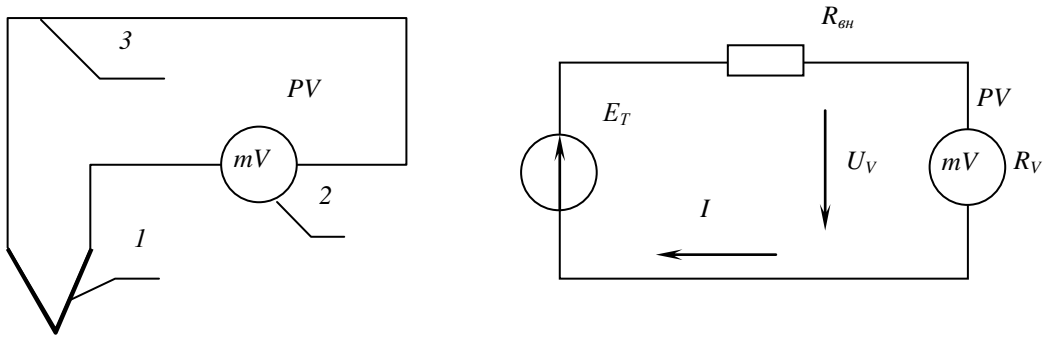
5.6.9. По первой точке кривой нагрева (α_1) определить температуру:

$$\Theta_1 = C \cdot \alpha_1 .$$

Определить предел измерений температуры данным термометром сопротивления с данным микроамперметром при неизменном напряжении источника питания:

$$\Theta_{max} = C \cdot \alpha_{max},$$

где α_{max} – число делений шкалы микроамперметра.



а) б)

1- термопара; 2 – милливольтметр; 3 – соединительные провода

Рисунок 5.3 – Измерение термоЭДС (а) и схема замещения (б) измерительной цепи

5.6.10. Поместить рабочий конец термопары в кипящую воду и измерить термоЭДС $E_T \approx U_T$ (рисунок 5.3). Предел измерений милливольтметра должен быть не более *50 мВ*. Отключить нагревательное устройство.

5.6.11. По градуировочной таблице определить разность температур горячего и холодного спаев ($\Theta_{гор} - \Theta_x$).

5.6.12. Вычислить температуру холодного спая (пренебрегая некоторой нелинейностью градуировочной характеристики):

$$\Theta_x = 100 - (\Theta_{гор} - \Theta_x).$$

5.6.13. Сделать выводы по выполненной работе (сравнить сложность измерительных схем при с использовании ТС и термопар, возможные погрешности и их причины).

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы термосопротивления.

2. Какие термосопротивления применяются в качестве датчиков температуры?

3. Какие имеются достоинства и недостатки у полупроводниковых термосопротивлений?

4. Какие вторичные приборы применяются совместно с термосопротивлениями?

5. Объясните принцип работы термопары.

6. Какие вторичные приборы применяют совместно с термопарами? Почему эти приборы должны иметь большое входное сопротивление?

7. Каковы основные причины погрешностей при измерениях температуры а) с помощью термосопротивлений; б) с помощью термопары?

8. Предполагаемая температура среды около $400\ ^0C$. Какой датчик температуры можно применить для измерения температуры?

9. Градуировочные характеристики каких датчиков можно считать практически линейными?

Раздел 2. Техника безопасности

Выполнение лабораторной работы необходимо осуществлять под руководством преподавателя.

Во время проведения лабораторной работы запрещается:

– включать электрический нагреватель и приборы без разрешения преподавателя;

– прикасаться к элементам оборудования и приборов, могущим оказаться под напряжением или имеющим высокую температуру;

– использовать оборудование, приборы и инструменты не по их назначению в данной лабораторной работе;

– перемещаться без разрешения преподавателя по аудитории.

Раздел 3. Форма и содержание отчета по работе

Отчет по лабораторной работе должен быть выполнен по формам на листах формата А4, согласно требований СТП 01.01.

Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- перечень оборудования, приборов и инструментов;
- краткие теоретические сведения по теме выполняемой работы;
- схемы и описание приборов;
- таблицу с результатами измерений;
- выводы по проделанной работе.

Список литературы

1. Бурдун, Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.
2. Бриндли, К. Измерительные преобразователи / К. Бриндли. – М.: Энергоатомиздат,1991. – 144 с.
3. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. –М.: Спектр, 2009. – 544 с.
4. Вавилов, В.П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике / В.П. Вавилов, А.Н. Александров. – М.: Энергопрогресс, 2003. – 76 с.
5. Волков, А.И. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск: Современная школа, 2005. – 608 с
6. Геращенко, О.А. Тепловые и температурные измерения / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. – Киев: Наукова думка, 1965. – 305 с.
7. Головин, Е.П. Практическое руководство по методике санитарного обследования вентиляции жилых помещений и общественных зданий / Е.П. Головин, М.А. Головина. – Москва – Ленинград: Гос. мед. изд-во, 1934. – 312 с.
8. Гордеев, Б.А. Метрология. Основные понятия и погрешности измерений / Б.А. Гордеев, Т.Н. Прахова. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2007. – 70 с.
9. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – М.: Стандартинформ, 2006. – 26с.
10. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 12 с.
11. ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М.: Стандартинформ, 2010. – 78 с.

12. ГОСТ 6651-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Термореобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. – М.: Стандартинформ, 2011. – 25 с.

13. Гурьев, М.Е. Тепловые измерения в строительной теплофизике / М.Е. Гурьев. –Киев: Вища школа, 1976. – 128 с.

14. Демидова В.Н. Электрические измерения /В.Н. Демидова: Под ред. В.Н. Малиновского. – М.: Энергоатомиздат,1985. – 416 с.

15. Дорохова, Н.Д. Определение и оценка параметров микроклимата производственных помещений / Н.Д. Дорохова, Ю.С. Зыга. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. – 38 с.

16. Дубнищев, Ю.Н. Оптические методы исследования потоков / Ю.Н. Дубнищев,В.А. Арбузов, П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003. – 418 с.

17. Иванов, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы / Г.М. Иванов, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: МЭИ, 2007. – 460 с.

18. Измерения в промышленности. Справ. изд.: в 3 кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: пер. с нем. Под общ. ред. П. Профоса – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 384 с.

19. Измерительные системы и комплексы / Институт оптико-электронных информационных технологий [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ioit.ru (дата обращения: 08.07.2017).

20. Исакович, Р.Я. Технологические измерения и приборы / Р.Я. Исакович. – М.: Недра, 1979. – 344 с.

21. Камразер, А.Н. Контрольно-измерительные приборы и автоматика / А.Н. Камразер, М.Я. Фитерман. – Л.: Химия, 1988. – 224 с.

22. Ковальногов, Н.Н. Теория и техника теплофизического эксперимента / Н.Н. Ковальногов, Н.М. Лукин. – Ульяновск: УлГТУ, 1999. – 196 с.

23. Кравченко, Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. – 88 с.

24. Кравцов А.В. Метрология и электрические измерения.: Уч. пособие /А.В. Кравцов. – 2-е изд., переаб. и доп. – М.: Колос, 1999. – 216 с.
25. Кравцов А.В. Электрические измерения / А.В. Кравцов, Ю.В. Рыбинский. – М.: Колос, 1979. – 351 с.
26. Крамарухин, Ю.Е. Приборы для измерения температуры / Ю.Е. Крамарухин. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
27. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества / П.П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
28. Котур В. И. Электрические измерения и электроизмерительные приборы /В. И. Котур, М.А. Сложная, Н.Н. Храмова. – М: Колос, 1986. – 400 с.
29. Кузнецов, Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
30. Кулаков, М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
31. Любимов Л.И. Электрические измерения /Л.И. Любимов. – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 318 с.
32. Мартенс, Л.К. Техническая энциклопедия. Т.1. Аэродинамика / Л.К. Мартенс. – М.: Советская энциклопедия, 1927. – 860 с.
33. Мурин, Г.А. Теплотехнические измерения / Г.А. Мурин. – М.: Энергия, 1979. – 424 с.
34. Мухин, В.С. Приборы контроля и средства автоматики тепловых процессов / В.С.Мухин, И.А. Саков. – М.: Высшая школа, 1988. – 256 с.
35. Манометрические термометры. Руководство по эксплуатации. – Klingenberg: WI-KA Alexander Wiegand SE & Co. KG, 2009. – 44 с.
36. Орнатский, П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые) / П.П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1986. – 504 с.
37. Половинкин, А.А. Основы общего земледелия / А.А. Половинкин. – М.: Учпедгиз,1958. – 496 с.

38. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
39. Приборы для измерения скорости и объемного расхода воздуха. Каталог. – М.: Тесто Рус, 2017. – 32 с.
40. Промышленные приборы и средства автоматизации: справочник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безновская, В.А. Бек [и др.]; под общ. ред. В.В. Черенкова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 847 с.
41. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – М.: Академия, 2004. – 336 с.
42. Соловцов, В.К. Контрольно-измерительные приборы / В.К. Соловцов. – М.: Высшая школа, 1969. – 272 с.
43. Тамахина А.Я. Стандартизация, метрология, подтверждение соответствия. Лабораторный практикум: учебное пособие / А.Я. Тамахина, Э.В. Бесланеев. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 320 с.
44. Тихомиров, А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор / А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – № 7. – С. 585–600.
45. Фарзане, Н.Г. Технологические измерения и приборы / Н.Г. Фарзане, Л.В. Илясов, А.Ю. Азимзаде. – М.: Высшая школа, 1989. – 456 с.
46. Федосов, И.Ф. Лазерный доплеровский анемометр / И.В. Федосов. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2008. – 18 с.
47. Фримантл, М. Химия в действии. В 2-х ч. Ч. 1; пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 528 с.
48. Хансуваров, К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара / К.И. Хансуваров. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 287 с.
49. Чистофарова, Н.В. Технические измерения и приборы. Ч.1. Измерение теплоэнергетических параметров / Н.В. Чистофарова, А.Г. Колмогоров. – Ангарск: АГТА, 2008. – 200 с.
50. Чистяков, В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям

/ В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

51. Электрические измерения / Е.М.Душина: Под ред. А.В.Фремке. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.

Учебное издание

Токарева Анна Николаевна
канд. техн. наук, доцент

Демченко Мария Станиславовна
канд. техн. наук, доцент

Мартынов Александр Петрович
канд. техн. наук, доцент

ПРИБОРЫ ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

Авторская редакция

Объем ЭИ: 6,56 МБ
Формат ЭИ Portable Document Format (PDF)

На титульную страницу