

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

Методы и средства измерений физических величин

Учебно-методическое пособие

для студентов специальности 1-38 01 01

«Механические и электромеханические приборы и аппараты»

Учебное электронное издание

М и н с к 2 0 1 2

УДК 621.391.1 (075.8)

А в т о р ы :

С.С.САВИЦКИЙ.

Р е ц е н з е н т ы :

В.Г.СМИРНОВ. Зам.директора БелГИПК работников метрологии и стандартизации, кандидат технических наук, профессор.

В.Г.ЛЫСЕНКО. Доцент кафедры «Стандартизации и метрологии »

В учебно-методическом пособии рассмотрены вопросы измерения температуры и давления, времени, угловых скоростей и других физических величин. Приведены методы измерений, схемы измерительных приборов и их метрологические характеристики.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 293-91-97 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/ПСФ80 – 19.2012

© БНТУ, 2012

© Савицкий С.С., 2012

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. УСТРОЙСТВО МЕХАНИЧЕСКИХ ЧАСОВ	6
2. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЧАСЫ.....	9
3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СПУСКОМ В ЧАСАХ.....	12
4. СВОБОДНЫЙ АНКЕРНЫЙ СПУСК.....	18
5. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ....	26
5.1 Общие сведения о тахометрах	26
5.2 Центробежные тахометры.....	26
5.3 Электрические тахометры.....	29
5.4 Магнитные тахометры.....	32
6. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ	37
6.1 Общие сведения о тахометрах, работающих бесконтактным методом	37
6.2 Электрические счетно-импульсные тахометры.....	37
6.3 Стробоскопические тахометры.....	38
7. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАКОНАХ ИЗЛУЧЕНИЯ	39
7.1 Устройство и работа радиационных пирометров	44
7.2 Устройство и работа яркостных пирометров	47
7.3 Устройство и работа цветковых пирометров.....	49
8. ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ С ТЕРМОРЕЗИСТОРАМИ ..	50
8.1 Компенсационный метод измерения	50
9. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР	55
9.1 Принцип действия термопар	55
9.2 Термоэлектродные материалы и термопары.....	58
9.3 Приборы для измерения ТЭДС.....	61
10 ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ.....	63
10.1 Основные понятия и классификация приборов для измерения давления ...	63
10.2 Жидкостные манометры.....	65
10.3 Деформационные (пружинные) манометры.....	67
10.4 Грузопоршневые манометры	71
10.5 Деформационные манометры	79
10.6 Тензорезисторные измерительные преобразователи давления.....	80
10.7. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи давления	83
11. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ.....	84
11.1 Основные положения.....	84
11.2 Металлические термометры сопротивления.....	85
11.3. Манометрические газовые термометры	87
11.4 Манометрические паровые термометры	90
11.5 Стандартные градуировки термометров сопротивления	93
11.6 Полупроводниковые терморезисторы	95
11.7 Позисторы	98

12. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВЕЩЕСТВА.....	99
12.1 Основные понятия и единицы.....	99
12.2 Виды расходомеров	99
12.3 Расходомеры постоянного перепада давления	103
12.4 Расходомеры скоростного напора и счетчики	104
12.5 Электромагнитные расходомеры	106
12.6 Ультразвуковые расходомеры	108
12.7 Массовые расходомеры.....	110
ЛИТЕРАТУРА	111

ВВЕДЕНИЕ

Современная производственная и научная деятельность человека требует измерения множества физико-механических величин. При реализации любого процесса измерений необходимы специальные технические средства, осуществляющие восприятие, преобразование, передачу и представление числового значения физической величины. Получение и обработка измерительной информации предназначены не только для достижения требуемого качества продукции, но и автоматизации производства и проведения научно-технических исследований, что позволит повысить экономичность и конкурентоспособность отечественной промышленности. Поэтому большое внимание должно уделяться подготовке высококвалифицированных инженерных и научных кадров в области приборостроения, метрологии и стандартизации, которые должны владеть необходимым комплексом знаний для решения проблем, возникающих на этапе создания и эксплуатации средств измерения.

Дисциплина «Методы и средства измерения физических величин» является частью специальной подготовки инженера-электромеханика по направлению «Приборы». В ней комплексно изучаются вопросы анализа и расчета характеристик средств измерения, конструктивное исполнение и метрологические характеристики, погрешности этих приборов и методы их уменьшения и компенсации, вопросы выбора средств измерения в зависимости от требуемой точности и условий эксплуатации, вопросы совершенствования и перспективы развития средств измерения.

1. УСТРОЙСТВО МЕХАНИЧЕСКИХ ЧАСОВ

Термин "часовой механизм" применяется к полностью собранным часам без корпуса. Часовой механизм состоит из: шестереночного механизма с двигателем в виде заводной пружины, которая приводит в движение этот механизм, и анкерного механизма, сдерживающего распускание пружины и контролирующего скорость вращения шестеренок. Если к часовому механизму добавить стрелки, то они будут регистрировать скорость вращения шестереночного механизма на циферблате.

Основные узлы механических часов собираются на платине - никель-серебряной пластине, которая является основанием часового механизма. Никель-серебряный сплав используется в швейцарской часовой промышленности по причине своей механической прочности и долговечности. Кроме отверстий для крепления осей шестеренок, платина имеет целую серию проточек, впадин и выступов, повышающих ее механическую прочность и дающих возможность разместить детали часового механизма на сравнительно малой площади. Противоположные концы шестеренок крепятся в отверстиях мостов - фасонных деталей, закрепляемых с помощью винтов на платине. Применение мостов облегчает сборку механизма и регулировку осевого люфта.

Для обозначения размера, формы часового механизма и пластин, к которым он крепится, используется термин калибр (Caliber). В Швейцарии, в отличие от России, калибры механизма указываются в линиях (Lignes). Одна линия соответствует 2.255 мм. Например, круглый калибр в 10 линий будет равен 22.55 мм в диаметре. Круглые калибры более распространены, хотя существуют овальные, прямоугольные с резаными краями, восьмиугольные и т.д.

Одной из составляющих точности хода часов является снижение трения. Такие части часового механизма, как оси шестеренок, ось баланса, ось вилки и т.д., опираются на синтетические рубиновые камни, представляющие собой плоские миниатюрные цилиндры с воронками для удержания часового масла. Применение в часах рубиновых камней обусловлено тем, что потери на трение у передающих пар должны быть минимальны. Этому требованию удовлетворяет рубин, имеющий наименьший коэффициент трения в паре со сталью, еще более снижающийся в процессе эксплуатации. Начало использования рубиновых камней уходит к 1700 году, когда начали использоваться природные рубины.

Использование синтетических камней началось в 1902 году, и сегодня без них не обходится ни одно часовое производство. В зависимости от качества механизма обычно используются 7, 15, 17 камней или 21 камень. Изменение кинематической схемы часов и введение дополнительных устройств ведет к увеличению числа камней, и в отдельных случаях оно может достигать 68 и даже 126 камней. В качестве источника энергии, обеспечивающего работу часового механизма применяется спиральная пружина, расположенная в барабане с зубчатым краем.

При заводке часов, пружине сообщается изгибающий момент, который при раскручивании преобразуется в крутящий момент барабана, вращение которого приводит в движение весь часовой механизм. Недостатком пружинного двигателя является неравномерность крутящего момента, передаваемого на баланс, что приводит к неточности хода часов.

Наибольший крутящий момент имеет полностью заведенная пружина, наименьший - раскрученная. Из-за такой неравномерности крутящего момента возникает погрешность в частоте колебаний баланса. А разница даже в 10 колебаний в сутки дает расхождение с точным временем в две секунды.

В особо точных часах - "Морских хронометрах" (Marine Chronometer), для компенсации разницы момента пружины, применяется устройство, называемое улитка (usee). Оно представляет собой конус, основанием которого является главная шестеренка часового механизма, на который спирально намотана цепь. Один конец цепи зацеплен за основание конуса, другой конец - за внешнюю поверхность пружинного барабана. Когда пружина заведена и имеет максимальный момент, цепь намотана на конус полностью, при этом конус оказывает максимальное сопротивление вращению за счет силы трения. По мере того, как пружина разворачивается, момент пружины уменьшается. Одновременно с уменьшением момента пружины уменьшается и усилие требуемое для поворота конуса. Таким образом, при правильно рассчитанном конусе, момент пружины будет постоянно одинаков, что обеспечит высокую точность хода часового механизма.

Для завода наручных часов также используется механизм автоподзавода. Классический механизм состоит из ротора (инерционного сектора), оборачивающегося вокруг центральной оси часов, и реверсивного устройства, обеспечивающего преобразование двухстороннего вращения ротора в одностороннее вращение вала пружинного барабана. При различных движениях запястья руки, под действием силы тяжести, ротор поворачивается вокруг своей оси, передавая через зубчатую передачу вращение на вал заводной пружины, заводя ее. В таких часах пружинный барабан устроен таким образом,

что во время завода пружины, при достижении максимального момента, пружина будет проскальзывать, предотвращая поломку часового механизма.

Для передачи энергии от пружины через шестереночный механизм к балансу, а также поддержания его колебаний и управления скоростью вращения шестереночного механизма, служит анкерный механизм. Анкерный механизм состоит из анкерного колеса (шестеренки), как правило, с 15 зубчиками, анкерной вилки, с впрессованными в паллеты синтетическими рубинами, и баланса. Анкер периодически освобождает зубчатую передачу и преобразует энергию пружины в импульсы, передаваемые балансу для поддержания его колебаний со строго определенным периодом, и преобразование этих колебаний в равномерное вращение шестереночного механизма. Изогнутые концы анкерной вилки называются паллетами. Их две - входная и выходная. При подъеме входной паллеты одновременно опускается выходная, и анкерное колесо поворачивается на один зубец. Затем поднимается выходная паллета и опускается входная, анкерное колесо поворачивается еще на один зубец и т.д. Во время подъема входной паллеты, под действием анкера, баланс поворачивается на пол-оборота до ограничителя, при этом собственная пружина баланса сворачивается. Во время опускания входной паллеты, под действием собственной разворачивающейся пружины, баланс совершает движение в обратную сторону до второго ограничителя. Таким образом, баланс постоянно совершает строго ограниченные полуколебания, уравновешивая тем самым ход часового механизма.

Поскольку само балансное колесо (баланс) представляет собой двойной маятник, то на точность его хода, как и в случае с простым маятником, оказывают влияние температура, трение и сила притяжения Земли. Так как балансное колесо делают из металла, то оно, как и все металлы, подвержены расширению и сжатию под действием температуры. Для минимизации этого влияния колесо делают биметаллическим: из материалов с разным коэффициентом расширения, например, стали и цинка.

Для уменьшения силы трения концы оси баланса (цапфы) делают очень тонкими, порядка 0.07-0.08 мм. Поэтому при неосторожном обращении с часами может произойти поломка цапфы. С целью предохранения оси баланса от поломки, для крепления баланса в платине и мосте используют противоударный механизм. В обычной конструкции узла баланса сквозные камни, в которых находятся цапфы, жестко запрессовывают в отверстия платины и моста, а накладные камни - в отверстия накладок, привинченных к плоскостям платины и моста. Между камнями оставляют зазоры, заполняемые при сборке узла часовым маслом. В противоударном механизме оси баланса запрессованы в специальные подвижные опоры. Подвижная опора устроена та-

ким образом, что при осевом ударе ось баланса будет смещаться вверх до тех пор, пока широкая часть оси баланса не упрется в узкое отверстие сквозного камня, приняв на себя, таким образом, силу удара. При боковом ударе ось баланса будет смещаться в бок до тех пор, пока не упрется своей утолщенной частью в стенку отверстия опоры. Таким образом, вместо тонких цапф, все нагрузки принимают на себя утолщенные части оси баланса, предохраняя первые от поломки и изгиба.

Для компенсации явления гравитации на анкерный механизм были изобретены сначала турбийонный регулятор в 1795 году, а затем в начале XX века - карусель.

2. ЭЛЕКТРОННЫЕ ЧАСЫ

Общая идея *работы* электронных часов сводится к следующему. В них есть генератор импульсов, частота которых стабилизирована кварцевым резонатором. За ним следует делитель частоты, который частоту импульсов генератора делит до частоты 1 Гц. Импульсы этой частоты используют для отсчета секунд. Частота импульсов генератора зависит от используемого в нем кварцевого резонатора, и обычно равна 32768 Гц. Вообще-то в генераторе можно использовать кварцевый резонатор на любую частоту, применив делитель частоты с коэффициентом деления, численно равным (в размах) частоте резонатора (в герцах).

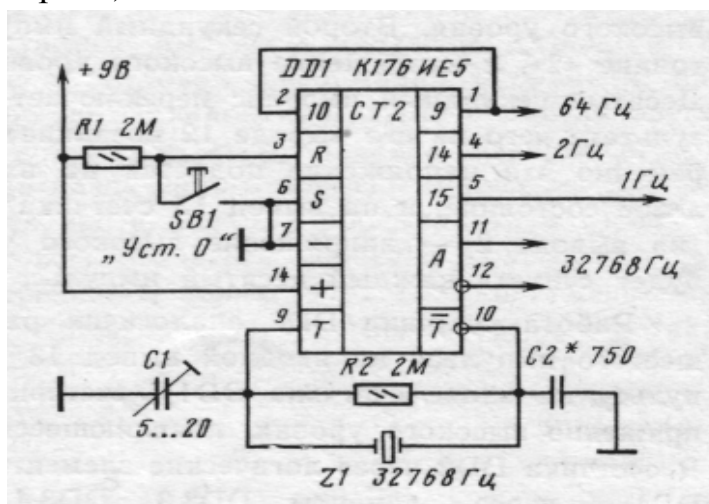


Рисунок 2.1- Схема кварцевого генератора на микросхеме K176IE5

На рисунке 2.1 показана схема одного из вариантов кварцевого генератора на микросхеме K176IE5. Эта микросхема содержит каскады для работы в генераторе с внешним резонатором на частоту 32 768 Гц и 15-разрядный двоичный делитель частоты. Выходной сигнал можно контролировать на выводах 11 и 12 генератора. Сигнал частотой 32768 Гц поступает на вход 9-

разрядного двоичного делителя частоты. С его выхода 9 (вывод 1) сигнал частотой 64 Гц подается на вход 10 (вывод 2) 6-разрядного делителя. На выходе 14 (вывод 4) пятого разряда этого делителя формируются импульсы частотой 2 Гц, а на выходе 15 (вывод 5) шестого — 1 Гц. Вход R (вывод 3) микросхемы служит для установки исходной фазы колебаний на выходах микросхемы. При подаче на него напряжения высокого уровня на выходах 9, 14, 15 возникает напряжение низкого уровня, а после снятия установочного уровня появляются сигналы соответствующей частоты, причем спад первого импульса . положительной полярности на выходе 15 возникает через 1 с. Конденсаторы C1 и C2 служат для точной установки частоты кварцевого генератора. Наибольшая емкость первого из них может быть 20 ... 30 пФ, второго — 30 ... 1000 пФ. При увеличении емкости конденсатора C1 частота генерации уменьшается.

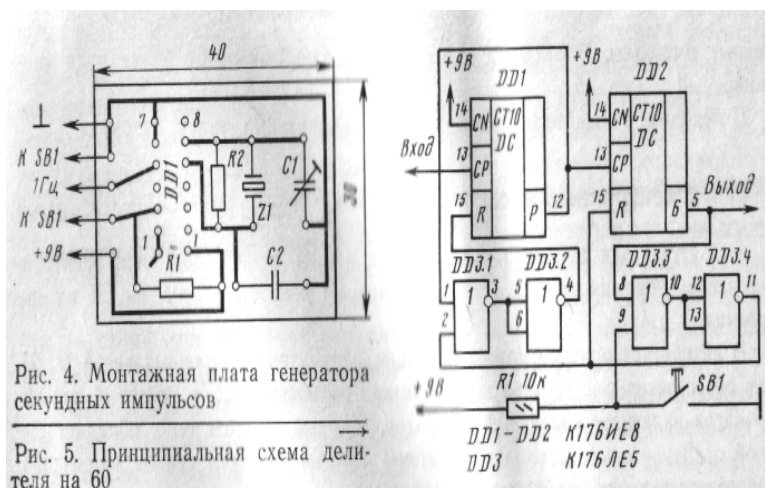


Рис. 4. Монтажная плата генератора секундных импульсов

Рис. 5. Принципиальная схема делителя на 60

Рисунок. 2.2- Монтажная плата генератора секундных импульсов

Рисунок. 2.3- Принципиальная схема делителя на 60

На рисунке 2.2 показана печатная плата и схема соединения деталей задающего генератора. При этом имеется в виду, что кнопка SB1 «Уст. О» вынесена за пределы этой платы.

Для запуска генератора после включения питания контакты кнопки SB1 замыкают, а для установки в исходное состояние — размыкают. При работе генератора на его выходе 15 (вывод 5) формируются секундные импульсы, которые используют для работы электронных часов.

Для получения минутных импульсов из секундных можно использовать делитель с коэффициентом деления 60, собранный, например по схеме, показанной на рисунке 2.3. Такой делитель представляет собой счетчик импульсов, выполненный на микросхемах K176IE8. Счетчик DD1 делит частоту входных импульсов на 10, DD2 — на 6. Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии, когда контакты кнопки SB1 разомкнуты, напряжение высокого уровня подается на входы R счетчиков DD1, DD2, и

они устанавливаются в нулевое состояние. При замыкании контактов кнопки SB1 счетчик DD1, начинает считать секундные импульсы, поступающие с выхода задающего генератора (см. вывод 5 DD1 на рис. 2.1). При первом секундном импульсе на выводе 13 счетчик DD1 переключается в состояние «1» и на его выводе 2 появляется напряжение высокого уровня. Второй секундный импульс переключает счетчик DD1 в состояние «2», и напряжение высокого уровня появляется на его выводе 4, и т.д. Десятый секундный импульс переключает этот счетчик в состояние «10», в результате чего на его выводе 12 возникает напряжение высокого уровня. Одновременно это напряжение подается на вход R, сбрасывая счетчик DD1 в нулевое состояние, и на вывод 13 счетчика DD2, переключая его в состояние «1» (на выводе 2 — напряжение высокого уровня). Таким образом, счетчик DD2 будет считать каждый десятый импульс, поступающий на вход счетчика DD1. Работа счетчика DD2 аналогична работе счетчика DD1. При поступлении шестого импульса на входной вывод 13 (что соответствует шестидесятому импульсу на входе счетчика DD1), счетчик DD2 переходит в состояние «6», напряжение высокого уровня, появляющееся на его выводе 5, подается: на вход R счетчика DD2 через логические элементы DD3.3, DD3.4, и на вход R счетчика DD1 — через элементы DD3.3, DD3.4, DD3.1 и DD3.2. При этом оба счетчика сбрасываются в исходное состояние, и начинается подсчет очередных шестидесяти секундных импульсов. В результате на выводе 5 счетчика DD2 получаем минутные импульсы.

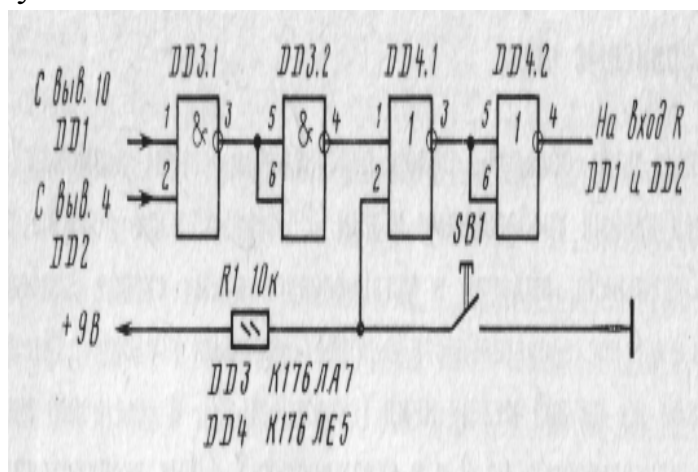


Рисунок 2.4- Схема сброса делителя частоты

Следует отметить, что используя еще один такой же делитель (по схеме рисунок 2.4) и подавая на вход первого его счетчика DD1 минутные импульсы, на выводе 5 второго счетчика такого делителя получим часовые импульсы. Аналогичный делитель можно использовать и для получения суточных (24 часа) и месячных (30 дней) импульсов. Коэффициент деления такого делителя должен соответствовать 24 и 30. Для получения коэффициента деле-

ния, равного 24, счетчики DD1 и DD2 должны одновременно отсчитывать соответственно четыре и два импульса. Достигается это изменением способа сброса счетчиков в нулевое состояние, как показано на рисунке 2.4. В этом случае сигналы с вывода 10 счетчика DD1 и вывода 4 счетчика DD2 одновременно подаются на входы логического элемента И, выполненного, например, на микросхеме К176ЛА7 (DD3). На выводе 4 элемента DD3.2 этой микросхемы напряжение высокого уровня появится в момент, когда счетчик DD1 отсчитывает четыре, а счетчик DD2 — два импульса, что будет соответствовать двадцати четырем часовым импульсам. Этот сигнал через элементы DD4.1 и DD4.2 поступает на входы R счетчиков и сбрасывает их в нулевое состояние. Для получения коэффициента деления, равного 30, делитель остается таким же, как делитель на 24, только на вход 1 элемента DD 3.1 необходимо подать сигнал с вывода 12 счетчика DD1, а на второй вход этого элемента — с вывода 7 счетчика DD2.

Для обеспечения индикации текущего времени можно воспользоваться одним из способов, описанных в [1, 2]. Задача значительно упрощается, если для этой цели использовать микросхемы типа К176ИЕ4 и К176ИЕ3.

Считаем, что минутные и секундные импульсы получены. Однако в быту кроме визуальной желательна еще и звуковая информация о времени; например, чтобы часы периодически, либо по заданной программе подавали звуковые сигналы. В простейшем случае — это режим будильника. Например, можно сделать так, что утром за 5 мин до назначенного времени будильник дает краткий звуковой сигнал, подготавливая вас к полному просыпанию, а через 5 мин звонит в течение минуты. Это может оказаться особенно полезным несущим дежурство у постели больного, ребенка. В таких ситуациях достаточно бывает сигнала длительностью 0,1 ... 0,5 с, чтобы проснуться. Можно сделать и так, что сначала будильник станет звонить тихо, через несколько минут громче, а еще через некоторый промежуток времен

3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СПУСКОМ В ЧАСАХ

Ход, спуск, спусковое устройство или спусковой механизм - все это названия одного и того же прибора в часах, в функции которого входит регулирование передачи механической энергии от пружины к балансу. Когда пружина заведена, она обладает некоторой потенциальной механической энергией. А спусковое устройство (или попросту - спуск) осуществляет импульсное высвобождение этой энергии.

Его часто сравнивают с человеческим сердцем, хотя это сравнение не совсем верно. Ведь сердце, кроме того, что выполняет регулирующую функ-

цию, берет на себя еще и роль пружины (привычнее - насоса). Правильнее было бы сравнить часовой спуск с сердечным клапаном, различные виды спусков по-разному "звучат", а часы из-за этого по-разному тикают. Данте имел честь наблюдать за работой часов, в которых спусковое устройство звучало, "как звуки струн на лире".

Вообще, за годы существования часового дела были созданы сотни различных видов спусковых механизмов. Но многие были изготовлены только в единственном экземпляре или очень ограниченными сериями и, таким образом, были преданы забвению. Другие просуществовали дольше, но от них окончательно отказались из-за трудностей в их производстве или из-за весьма посредственного исполнения. В этой статье приведен краткий обзор основных видов спусков, учитывая их роль в историческом развитии часов вообще и спусковых устройств в частности.

Шпиндельный ход. Дедушкой всех спусковых механизмов является шпиндельный ход, изобретенный великим голландским математиком и физиком Христианом Гюйгенсом (1629-1695 гг.). Гюйгенс применил его еще в маятниковых часах. В 1674 году по проекту Гюйгенса парижским часовщиком Тюре были изготовлены часы переносного типа. (Рисунок 3.1).

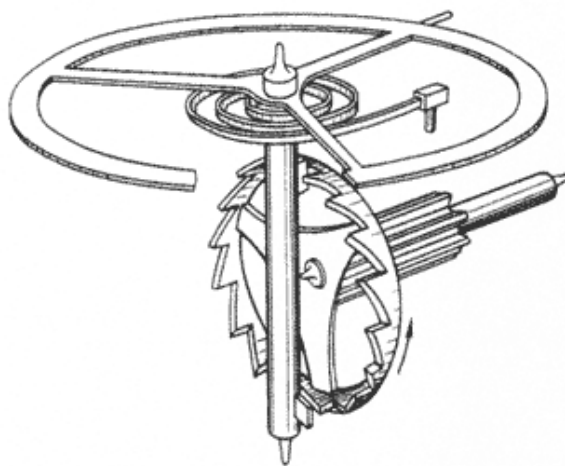


Рисунок 3.1- Часы переносного типа

Шпиндельный ход, сохраненный в карманных часах, продолжали применять и после Гюйгенса. С самых ранних образцов и до 80-х годов XIX столетия шпиндельный ход в своих существенных чертах почти не изменялся. Главным недостатком шпиндельного хода являлся откат назад ходового колеса, оказывавший дестабилизирующее действие на точность часового механизма. Устранением этого дефекта и начали заниматься часовщики Англии и Франции. Однако все их старания избавиться от него, сохранив шпиндельный ход, к сожалению, не увенчались успехом.

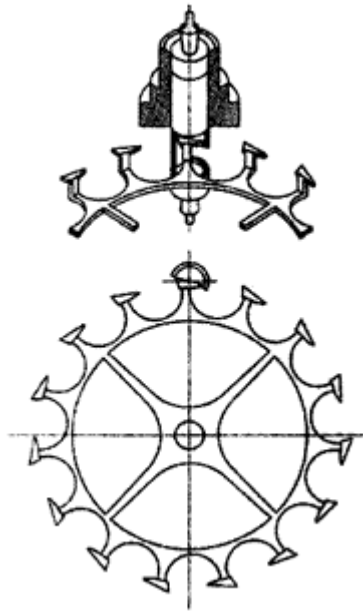


Рисунок 3.2- Цилиндровый ход

Цилиндровый ход. Шпindelный ход стал постепенно вытесняться после появления цилиндрического хода. Томас Томпион, который его изобрел, сумел устранить проблему отката назад ходового колеса. (Рисунок 3.2). Но широкое применение цилиндрический ход приобрел только с 1725 года, после его усовершенствования англичанином Георгом Грэхемом, которого, в общем-то, и принято называть изобретателем цилиндрического хода. Интересно, что хотя этот ход был придуман англичанами, его чаще использовали во Франции.

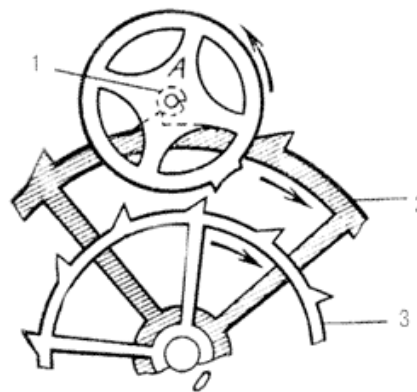


Рисунок 3.3- Дуплекс ход

Дуплекс-ход. А этот ход, будучи изобретенным во Франции, получил широкое применение среди часовщиков Англии. Его изобретение приписывается Роберту Гуку и Иоганну Баптисту Дю-тертру из Парижа (рисунок 3.3). Более поздняя и весьма обычная форма дуплекс-хода была основана на изобретении выдающегося французского часовщика Пьера Леруа (1750 год) (рисунок 3.4). Оно заключалось в замене двух колес одним и в совмещении на

этом колесе зубцов, которые до этого были разнесены на два колеса. Этот ход нашел применение в так называемых "долларовых" часах, предназначенных для массового производства часовой фирмой "Waterbury" (США). Дуплексный ход считается теперь устаревшим, но сохранился в некоторых старинных часах.

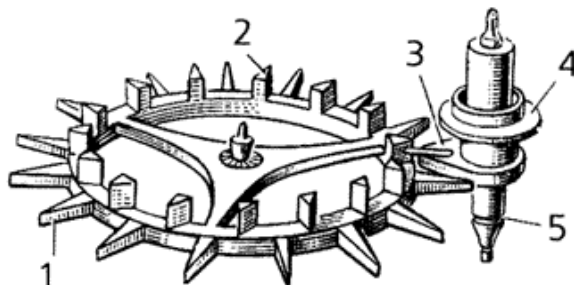


Рисунок 3.4-Дуплекс- ход французского часовщика Пьера Леруа

В 1750 - 1850 гг. часовщики увлекались изобретением все новых и новых ходов, отличных по своему устройству И было изобретено их свыше двухсот, но лишь немногие получили распространение. В "Руководстве по часовому делу" (Париж, 1861 год) отмечено, что из большого количества появившихся ходов, так или иначе ставших известными, к тому времени сохранилось не более десяти-пятнадцати. К 1951 году их количество вообще свелось к двум.

Свободный анкерный ход. В настоящее время в карманных и наручных часах чаще всего применяется свободный анкерный ход, изобретенный Томасом Мьюджем в 1754 году. В основу его был положен несвободный анкерный ход, разработанный его учителем Георгом Грэхемом для маятниковых часов. В отличие от последнего, свободный анкерный ход обеспечивает свободное колебание баланса. Баланс в течение значительной части своего движения не испытывает какого-либо воздействия со стороны спускового регулятора, так как он разъединен с балансом, но вступает с ним во взаимодействие на мгновение для освобождения ходового колеса и передачи импульса. Отсюда происходит английское название этого хода *detached lever escapement* - "свободный анкерный ход". Анкерным же он называется потому, что по форме напоминает якорь (франц. - *anchor*). Первый свободный анкерный ход в исполнении Томаса Мьюджа был применен в часах, изготовленных им в 1754 году для супруги короля Георга III Шарлотты. Эти часы находятся теперь в Виндзорском замке. Хотя сам Мьюдж изготовил только две пары карманных часов с этим ходом, но его изобретение положило начало всем используемым ныне во всех карманных и наручных часах современным свободным ходам. Мьюдж справедливо считал изобретенный им ход слишком трудным в изготовлении и применении и даже не пытался найти возмож-

ность для распространения своего детища. Отсутствие высоких технологий в часовом производстве середины XVIII века надолго задержало широкое применение анкерного хода. И потому же он долго не был оценен по достоинству.

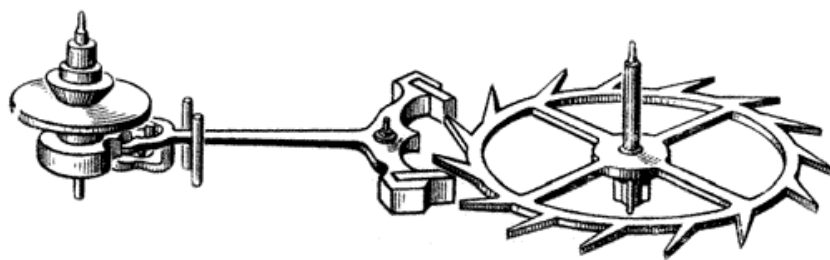


Рисунок 3.5- Анкерный ход

Изобретение Мьюджа долго не использовалось, пока Георг Севедж, знаменитый часовщик из Лондона, не развили идеи Мьюджа и не привел их к более современному виду - классическому типу английского анкерного хода (рисунок 3.5). Дальнейшим усовершенствованием устройства свободного анкерного хода занялись швейцарцы. Именно они предложили ход, в котором ходовое колесо изготавливалось с широким зубом на конце (в английском варианте зуб был заостренным). Изобретение швейцарского анкерного хода приписывают выдающемуся часовщику Аврааму Луи Бреге. Сегодня почти в каждом свободном анкерном ходе в точных переносных часах зубья ходового колеса изготавливают с широким концом (рисунок 3.6).

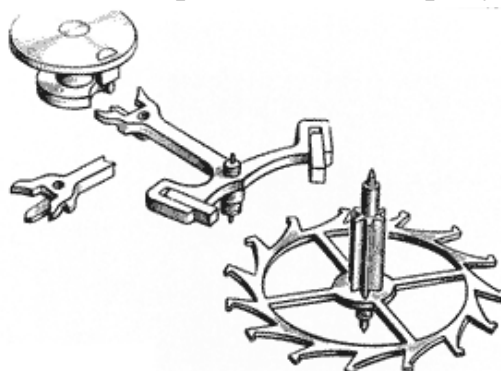


Рисунок 3.6-Зубья ходового колеса с широким концом.

Штифтовой анкерный ход в карманных часах был применен Георгом Фредериком Роскоп-фом около 1865 года и впервые был представлен на Парижской выставке в 1867 году (рисунок 3.7). Обычно этот ход относят к типу свободных ходов, предназначенных для применения в карманных и наручных часах. Однако, в нем применены штифтовые металлические палеты (для сравнения: в английском и швейцарском анкерных ходах палеты изготавливаются из рубина или сапфира). По своему качеству штифтовой анкерный ход уступает во всех отношениях всем видам свободных ходов и имеет

несравненно более ограниченную область применения. Он используется только в недорогих часах массового производства. Часто ход со штифтовыми палетами выдают за ход Роскопфа, но это не совсем верно. Этот ход не может считаться изобретением Роскопфа. Заслуга хитроумного швейцарца в том, что он сумел удачно объединить в созданной им конструкции хода изобретения, сделанные другими, и организовать массовое производство дешевых часов с этим ходом. Роскопф применил простейшие и экономичные в изготовлении детали и узлы. Немало он потрудился и над усовершенствованием технологии их массового производства.

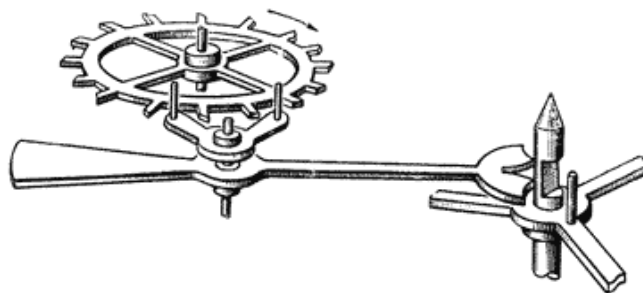


Рисунок 3.7- Штифтовый спуск

Штифтовой ход широко применяется не только в дешевых карманных и наручных часах, но и в будильниках, изготовление которых также носит массовый характер. В этом случае штифтовой ход стоит вне конкуренции. Вообще, штифтовой ход в смысле точности и постоянства нисколько не хуже английского и швейцарского анкерных ходов. К его недостатку следует отнести недолговечность. Часы со штифтовым ходом раньше изнашиваются.

Коаксиальный спуск. И, конечно же, нельзя не упомянуть о коаксиальном спуске Джорджа Дэниэлса (подробнее о нем читайте в апрельском номере журнала). Этот спуск, подобно свободному анкерному ходу Томаса Мьюджа в свое время, сейчас не может быть широко применен в часовой промышленности из-за высоких производственных и технологических требований. Хотя Джордж Дэниэлс изобрел свой спуск более двадцати лет назад, часовая промышленность, даже швейцарская, не была готова к его применению вплоть до 1999 года. Как заметил сам Дэниэлс, она (промышленность) была занята изготовлением все более и более сложных часов. С турбийоном, например. И не уделяла большого внимания совершенствованию внутреннего устройства часового механизма. Коаксиальный спуск, таким образом, стал самым серьезным шагом, сделанным часовой промышленностью со времени применения кварца.

4. СВОБОДНЫЙ АНКЕРНЫЙ СПУСК

В спусковых регуляторах с балансом чаще применяются свободные анкерные спусковые механизмы. На рисунке 4.1 показаны основные части свободного анкерного спускового механизма. На оси баланса (на рисунке не показана) неподвижно посажен двойной ролик **1**, в который запрессован импульсный штифт (эллипс) **2**, посредством которого баланс взаимодействует с анкерной вилкой. Узел баланс с волоском и двойным роликом при сборке регулируется так, что в равновесном положении баланса импульсный штифт находится на линии центров баланса и анкерной вилки. Анкерная вилка установлена на ось **13**, опирающуюся на подшипники (на рисунке не показаны), и имеет две палеты: входную палету **14** и выходную палету **6**. Рабочими поверхностями палет являются плоскости импульса **7** и плоскости покоя **5**. Угол поворота анкерной вилки ограничен двумя штифтами, запрессованными в пластину и расположенными симметрично относительно линии центров баланса и анкерной вилки. Палеты находятся в зацеплении с зубьями спускового анкерного колеса **9**. Расстояние между палетами таково, что одновременно могут находиться в соприкосновении только один из зубьев анкерного колеса с одной из палет. Обычно анкерное колесо имеет 15 зубьев, и расстояние между серединами импульсных плоскостей палет, измеренное по дуге окружности острий зубьев анкерного колеса, составляет $2\frac{1}{2}$ шага колеса. Анкерное колесо неподвижно посажено на анкерный триб **8**, связывающий анкерное колесо зубчатой передачей с двигателем (чаще пружинным) и стрелками часов. Зубья анкерного колеса имеют плоскость импульса **12**, острие **11** и пятку **10**. Анкерное колесо и анкерная вилка современных карманных и наручных часов обычно изготавливаются из стали. Импульсный штифт и палеты изготавливаются из синтетического рубина, их рабочие поверхности полируются.

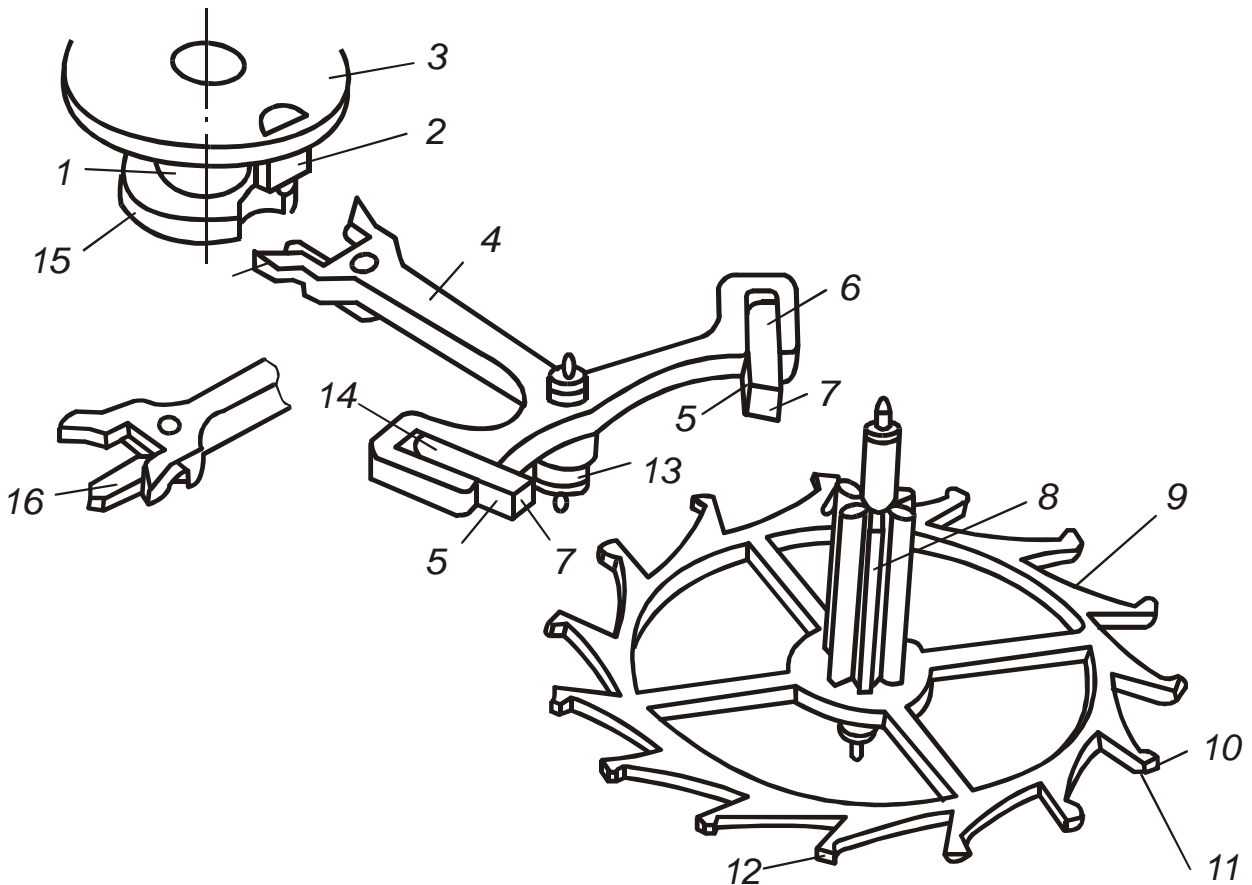


Рисунок 4.1- Основные части свободного анкерного спускового механизма.

1 – двойной ролик; *2* – эллипс; *3* – импульсный ролик; *4*– анкерная вилка; *5* – плоскость покая палеты; *6* – выходная палета; *7* – плоскость импульса палеты; *8* – триб анкерного колеса; *9* – анкерное колесо; *10*- пятка зуба; *11* – острие зуба; *12* – плоскость импульса на зубе; *13* – ось вилки; *14*– входная палета; *15* – предохранительный ролик; *16* – копые.

Рассмотрим работу свободного анкерного спуска (рисунок 4.2). Предположим, что баланс находится в крайнем положении и начинает вращение против хода часовой стрелки. Под воздействием момента, развиваемого волоском, баланс движется свободно, без какого бы на то ни было взаимодействия с анкерной вилкой. Энергия колебательной системы в это время расходуется только на трение в подшипниках баланса, сопротивление воздуха и гистерезис волоска. Анкерная вилка в это время отклонена влево от линии центров вилки и баланса и давлением зуба *1* на плоскость покая входной палеты прижата к левому ограничительному упору. Это положение механизма показано на рисунке 4.2 а. Прижим (притяжка) вилки к ограничительному упору достигается благодаря расположению плоскости покая входной палеты под острым углом к радиусу, проведенному из оси вращения анкерной вилки на переднее ребро входной палеты (рисунок 4.3). Дополнительный до 90° угол τ называется углом притяжки. Для обеспечения прижима вилки к упору угол притяжки должен быть больше угла трения зуба о палету. Обычно $\tau = 10 - 15^\circ$. На рис. 3 показан также угол притяжки на выходной палете.

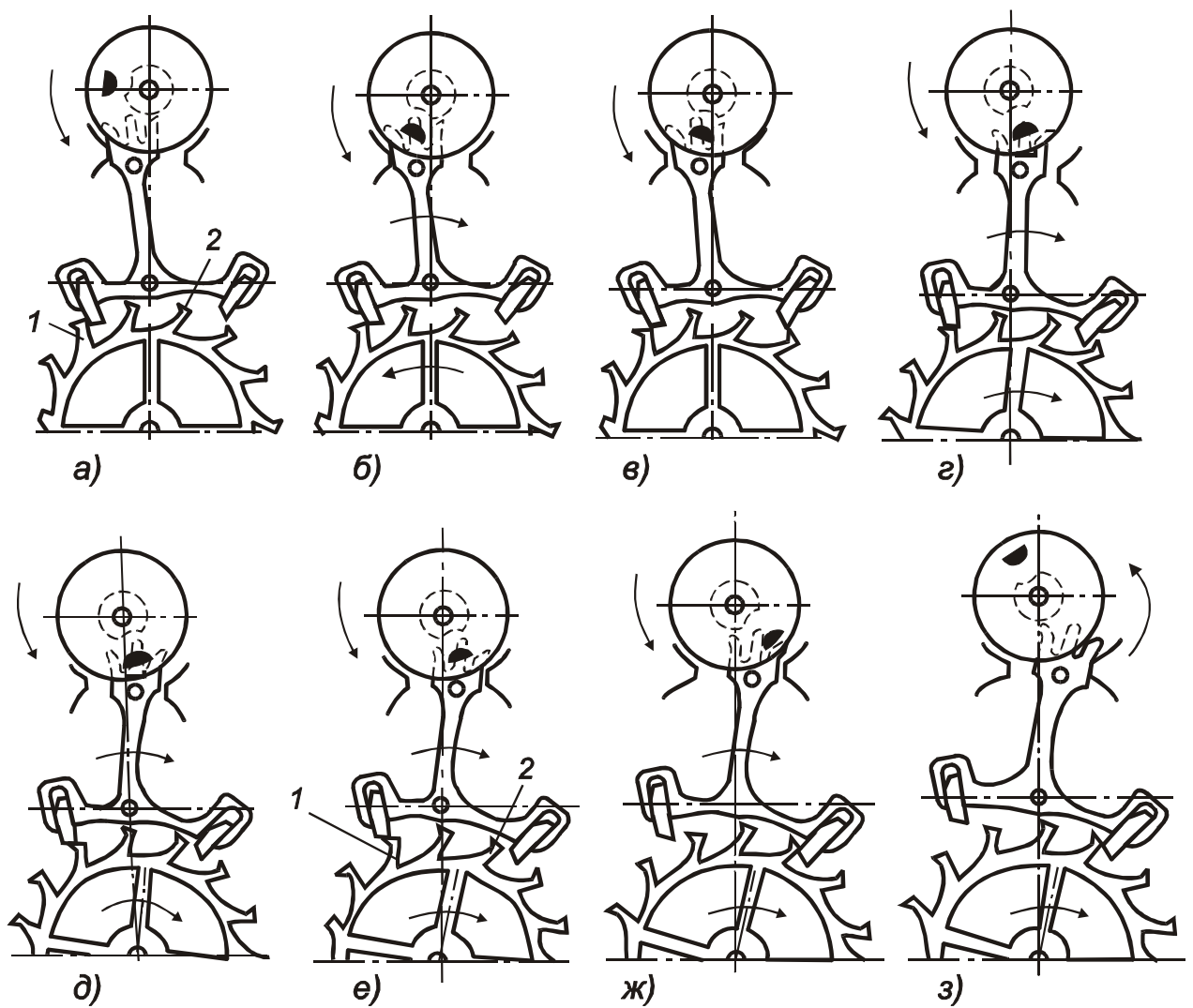


Рисунок 4.2- Работа свободного анкерного спускового механизма

Угол поворота баланса от его крайнего положения до начала взаимодействия с анкерной вилкой называется дополнительным углом. В спусковых регуляторах карманных или наручных часов дополнительный угол составляет 90 - 95% амплитуды колебаний ($135 - 285^\circ$). Таким образом, баланс большую часть своего движения совершает свободно, без взаимодействия с анкерной вилкой. Отсюда и произошел термин «свободный анкерный спуск». Свободное движение баланса продолжается до тех пор, пока импульсный штифт, войдя в паз вилки, ударится о правую стенку паза (рисунок 4.2, б). С этого момента начинается взаимодействие колебательной системы (баланса) со спусковым механизмом. Баланс, продолжая движение, поворачивает анкерную вилку и выводит входную палету из-под острия зуба *1* анкерного колеса, тем самым, освобождая анкерное колесо. В это время баланс является ведущим звеном, а вилка – ведомым, и происходит расход части запаса энергии колебательной системы на освобождение анкерного колеса. Благодаря наличию угла притяжки при освобождении анкерное колесо поворачивается

на небольшой угол против хода часовой стрелки. Положение механизма к концу освобождения показано на рисунке 4.2, в. Угол поворота анкерной вилки во время освобождения называется углом освобождения, или полным углом покоя. Освобождение анкерного колеса закончится, когда баланс повернет вилку на столько, что острие зуба окажется на переднем ребре входной палеты. Колесо получило возможность вращаться в направлении хода часовой стрелки под действием усилия заводной пружины. Острие зуба скользит по плоскости импульса входной палеты, сообщая анкерной вилке подталкивающий импульс, который передается балансу. При передаче импульса ведущим звеном в паре баланс-анкерная вилка, является вилка. Запас энергии баланса пополняется за счет энергии пружинного или иного двигателя часового механизма. Положение спускового механизма во время передачи импульса давлением острия зуба на плоскость импульса входной палеты показано на рисунке 2, г. Во время передачи импульса баланс проходит положение равновесия, причем эллипс проходит линию центров анкерной вилки и баланса. После того как острие зуба дойдет до заднего ребра палеты, передача импульса продолжается, но уже при скольжении заднего ребра палеты по плоскости импульса зуба (рисунок 4. 2, д). Таким образом, в рассматриваемом спусковом механизме передача импульса как бы распределена между плоскостями импульса на палете и на зубе. Такие спусковые механизмы называются механизмами с распределенным импульсом. Существуют механизмы, где передача импульса осуществляется только за счет скольжения острия зуба по плоскости импульса палеты – это механизмы с острыми зубьями спускового колеса, а также механизмы с передачей импульса только на плоскости импульса зуба – это механизмы типа штифтового спуска, изображенного на рисунке 4.3. Угол поворота анкерной вилки во время передачи импульса называется углом импульса λ_a . Он складывается из угла импульса на зубе λ_{az} и угла импульса на палете λ_{an} (рисунке 4.3):

$$\lambda_a = \lambda_{az} + \lambda_{an}; \quad (4.1)$$

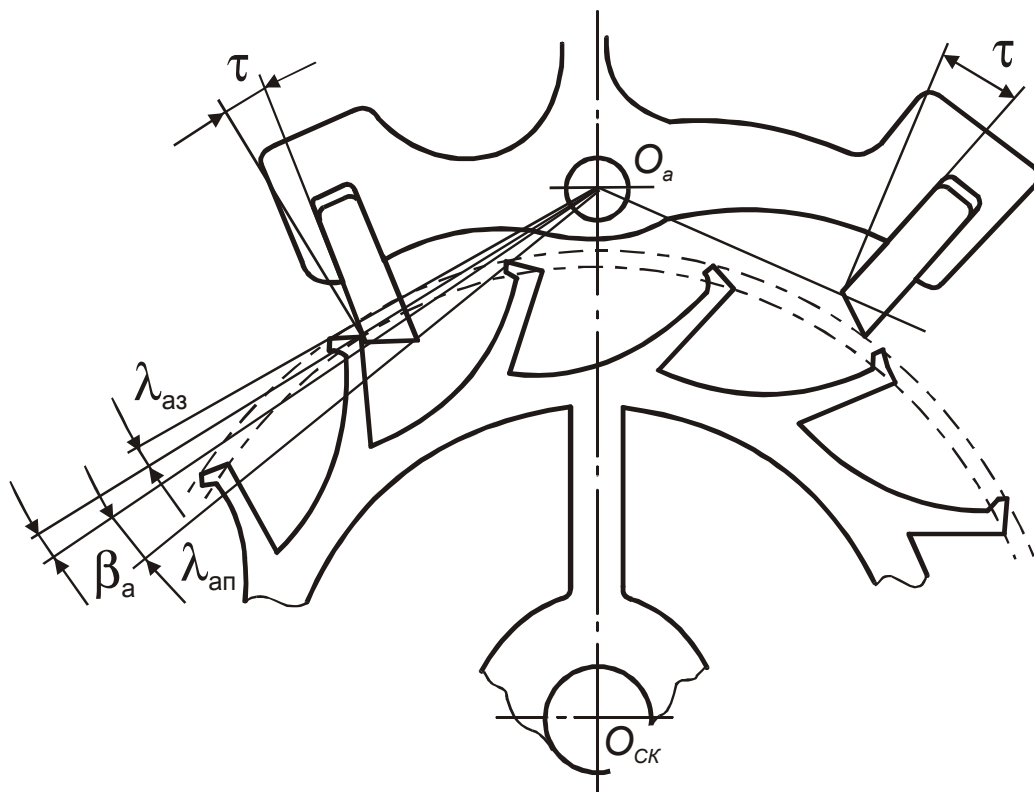


Рисунок 4.3- Углы притяжки, покоя и импульса

Передача импульса заканчивается в момент, когда пятка зуба достигает заднего ребра палеты (рисунок 4. 2, е). На этом заканчивается и период взаимодействия анкерной вилки и баланса. Под действием нарастающего момента волоска баланс движется далее замедленно до остановки, проходя дополнительный угол.

На рисунке 4. 4, а видно, что после окончания импульса анкерная вилка повернется еще на небольшой угол δ_a , прежде чем ляжет на правый ограничительный упор. Этот резервный угол поворота, называемый углом потерянного пути, необходим для обеспечения беспрепятственного прохождения зубьев анкерного колеса под задним ребром палеты в условиях наличия неизбежных производственных погрешностей размеров и взаимного расположения деталей и узлов спускового механизма (эксцентриситет анкерного колеса, и т.п.). Величина угла потерянного пути обычно от $30'$ до $45'$. Такой же резервный угол поворота вилка имеет и у левого упора. Разность полного угла покоя (β_{an}) и угла потерянного пути (δ_a) называется расчетным углом покоя (β_a):

$$\beta_a = \beta_{an} - \delta_a; \quad (4.2)$$

Сумма расчетного угла покоя (β_a) и угла импульса (λ_a) называется углом подъема анкерной вилки (θ_a):

$$\theta_a = \beta_a + \lambda_a; \quad (4.3)$$

Соответствующий угол поворота баланса θ называется углом подъема баланса.

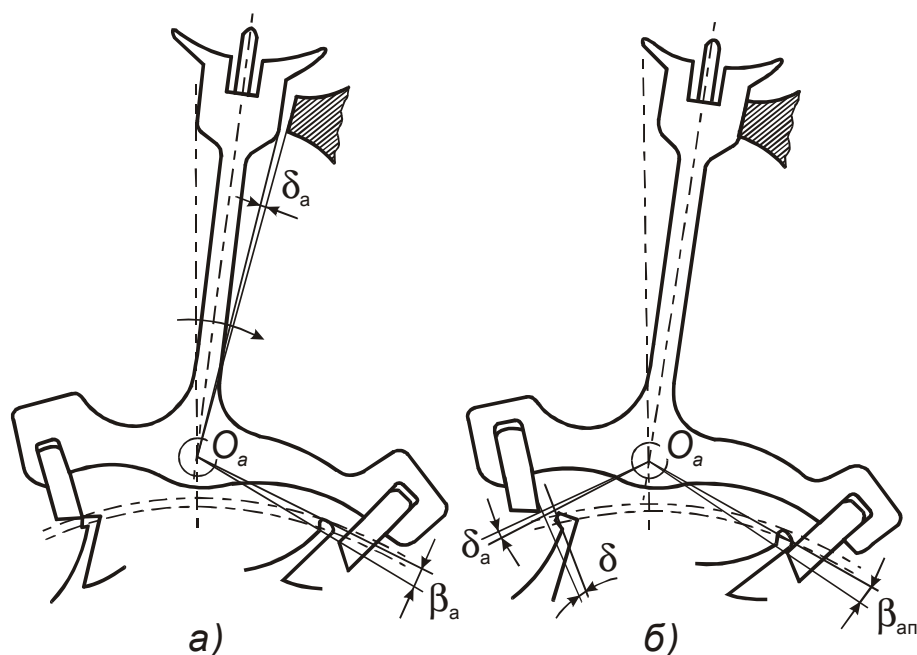


Рисунок 4.4- Угол потеряннго пути, полный угол покоя и угол падения анкерного колеса

После окончания импульса на входной палете анкерное колесо свободно поворачивается еще на небольшой угол, пока зуб 2, ближайший к выходной палете, не упадет на плоскость покоя этой палеты (рисунок 4.2, ж). Давление зуба плотно прижмет анкерную вилку к правому упору (рисунок 4.2, з). Угол поворота анкерного колеса с момента окончания импульса и до падения зуба на плоскость покоя называется углом падения δ (рисунок 4.4, б). Во время прохождения угла падения анкерное колесо не взаимодействует с анкерной вилкой, и работа, совершаемая двигателем, не используется для поддержания амплитуды колебаний баланса; она рассеивается при ударе зуба о плоскость покоя. Поэтому угол падения не должен быть больше, чем необходимо для безотказного действия спускового механизма в условиях наличия производственных погрешностей шага, толщины зубьев, взаимного расположения и толщины палет. Обычно в свободных анкерных спусках наручных и карманных часов угол падения составляет от $1^{\circ}30'$ до 2° . При движении баланса против часовой стрелки цикл работы спускового механизма повторяется с той лишь разницей, что освобождение и передача импульса происходят на выходной палете, а падение зуба на плоскость покоя – на входной палете. За период колебаний баланса передача импульса и падение анкерного колеса происходят дважды, и каждый раз анкерное колесо поворачивается на половину углового шага. Таким образом, анкерное колесо вращается прерывисто, скачками, со средней скоростью

$$n_{ск} = \frac{60}{T \cdot z_{ск}}, \text{ об/мин.}; \quad (4.4)$$

Так, например, период колебаний баланса наручных и карманных часов обычно равен 0,4 сек. и анкерное колесо имеет 15 зубьев. Следовательно, оно совершает 10 об/мин.

Во время освобождения спускового колеса и передачи импульса анкерная вилка кинематически связана с балансом, и углы поворота вилки и баланса взаимозависимы. Угол φ отклонения баланса от положения равновесия связан с углом φ_a отклонения анкерной вилки от линии центров $O_b O_a$ -

соотношением

$$\varphi \approx \varphi_a \frac{r_a}{r_b}; \quad (4.5)$$

Здесь r_a - действующая длина анкерной вилки (рисунок 4.5);

r_b - расстояние от оси вращения баланса до центра дуги окружности, образующей контур поперечного сечения импульсного штифта.

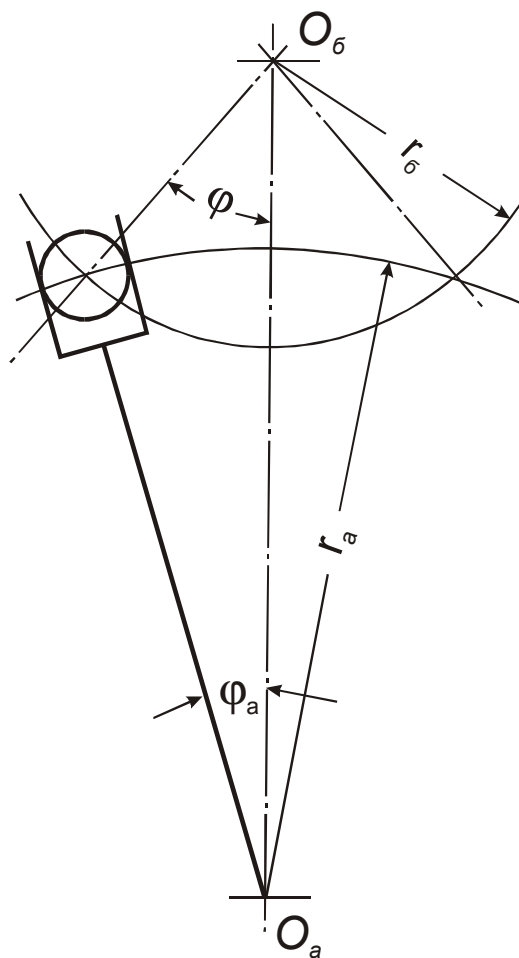


Рисунок 4.5- Схема взаимодействия анкерной вилки и баланса:

1 – эллипс; 2 – анкерная вилка

Во время прохождения балансом дополнительных дуг анкерная вилка не взаимодействует с балансом и прижата к одному из ограничительных упоров давлением зуба анкерного колеса. Чтобы не произошло переброса вилки к другому ограничительному упору под действием случайного толчка, спусковой механизм имеет предохранительное устройство, показанное на рисунке 4.5, двойной ролик **1**, сидящий на оси баланса, состоит из импульсного ролика **3**, в котором укреплен импульсный штифт (эллипс) **2**, и предохранительного ролика **15**, имеющего полукруглый вырез, расположенный под импульсным штифтом. Анкерная вилка имеет копые **16**, запрессованное в хвостовую часть вилки и расположенное по высоте на уровне предохранительного ролика. Если по какой-либо причине анкерная вилка отойдет от ограничительного упора в то время, когда баланс проходит дополнительную дугу, копые коснется боковой поверхности предохранительного ролика и не позволит вилке отойти от упора настолько, чтобы острие зуба оказалось бы на плоскости импульса палеты. Поворот вилки становится возможен во время освобождения импульса, когда копые входит в вырез предохранительного ролика. Чтобы не произошло случайного поворота вилки непосредственно перед началом освобождения или тотчас после окончания импульса, вилка имеет удлиненные рожки, которые при отходе вилки от ограничительного упора касаются импульсного штифта, делая невозможным дальнейший поворот вилки.

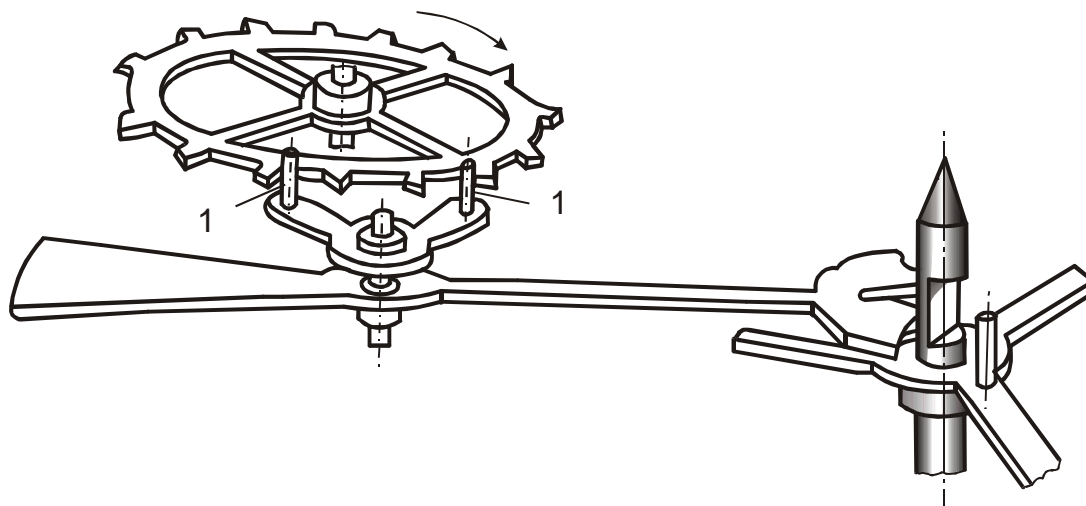


Рисунок 4.6- Штифтовый спуск

Свободный анкерный спусковой механизм описанного выше типа применяется в настоящее время почти во всех карманных и наручных часах и во многих других часовых механизмах. Довольно широкое применение в дешевых часовых механизмах типа будильника имеет так называемый штифтовой спуск (рисунок 4.6), являющийся разновидностью свободного анкерного спуска. Палеты в этом спуске выполнены в виде цилиндрических стальных

штифтов *I*, запрессованных в анкерную вилку. Передача импульса осуществляется при скольжении палеты по импульсной плоскости зуба, а притяжка достигается за счет поднутрения передней грани зуба.

5. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ

5.1 Общие сведения о тахометрах

Угловая скорость и частота вращения измеряются с помощью приборов, называемых тахометрами. За единицу угловой скорости принят радиан в секунду- (рад/с). Единицей частоты вращения является секунда в минус первой степени (с-1).

По принципу действия первичного преобразователя тахометры разделяют на механические, магнитные, электрические и стробоскопические. Механические тахометры имеют в своем составе только механические преобразователи. К ним относятся центробежные, фрикционные, часовые, гидравлические, пневматические. Отличительной особенностью магнитных тахометров является то, что наряду с другими преобразователями они имеют магнитный индукционный преобразователь. Для электрических тахометров характерно наличие в измерительной цепи электромеханических преобразователей. К этой группе относятся -электромашинные и электроимпульсные тахометры. Действие стробоскопических тахометров основано на создании с помощью специальных преобразователей стробоскопического эффекта.

По способу применения все тахометры классифицируются на стационарные и переносные. Стационарные, как правило, служат для постоянного измерения скорости какого-либо объекта и соединяются с основным валом этого объекта посредством специального передаточного устройства. Переносные (ручные) тахометры присоединяются к контролируемому валу только на время измерения скорости вращения.

По методу измерения различают тахометры, работающие контактным и бесконтактным методами. К первой группе относятся все вышеперечисленные приборы, за исключением нескольких разновидностей электроимпульсных и стробоскопических тахометров, работающих по бесконтактному методу.

5.2 Центробежные тахометры

Принципиальная схема центробежного тахометра с грузиками представлена на рисунке 5.2.1. В тахометре имеются грузики 1, симметрично расположенные относительно оси тахометра 2. Тяги 3 шарнирно связаны с двумя

муфтами.

Одна из них (4) жестко связана с осью тахометра, а вторая (5) имеет возможность перемещаться по оси 2 в вертикальном направлении. Между муфтами установлена пружина 6, стремящаяся их разжать и приблизить грузики к оси тахометра. При такой конструкции грузики вместе с пружиной представляют собой первичный преобразователь тахометра.

Вал тахометра приводится во вращение от входного валика 7 через зубчатую передачу. При вращении грузиков развивается центробежная сила Q , действующая в плоскости, перпендикулярной оси тахометра, и направленная радиально. Эта сила может быть разложена на составляющие Q_1 и Q_2 - направленные вдоль тяг. Составляющая Q_{oc} силы Q , направленная вдоль оси вращения, перемещает подвижную муфту, пока не будет уравновешена упругой противодействующей силой пружины.

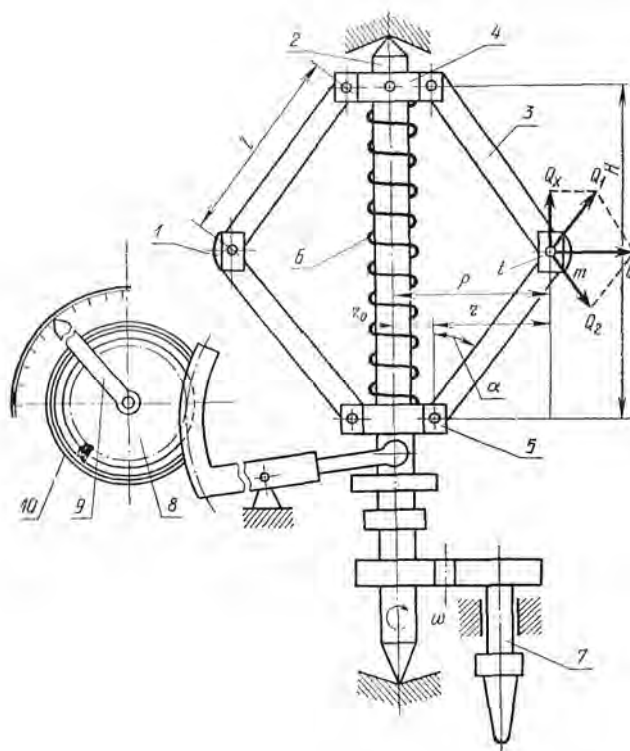


Рисунок 5.2.1- Схема центробежного тахометра

Таким образом, перемещение подвижной муфты является выходным сигналом преобразователя, и уравнение действующих сил в равновесном состоянии имеет вид:

$$cy = Q_{oc}k ; Q_{oc} = Q_x ; \quad (5.2.1)$$

где k — количество грузиков; c — жесткость пружины; y - деформация пружины.

Далее линейное перемещение подвижной муфты при помощи трибо-секторного механизма 8 преобразуется в угловое перемещение стрелки 9.

Волосок 10 служит для устранения мертвого хода в передаточном механизме.

Статическая характеристика центробежного тахометра может быть получена из уравнения следующим образом.

Составляющая центробежной силы, направленная вдоль оси тахометра:

$$Q_{oc} = \frac{Q}{2 \operatorname{tg} \alpha}; \quad (5.2.2)$$

Центробежная сила:

$$Q = m \rho \omega^2; \quad (5.2.3)$$

где m — масса одного грузика; ρ — расстояние от оси вращения до центра сосредоточенной массы; ω — скорость вращения оси тахометра.

Принимая во внимание, что $\rho = r + r_0$, а $r = l \sin \alpha$, получаем:

$$Q_{oc} = \frac{m(r_0 + l \sin \alpha)}{2 \operatorname{tg} \alpha} \omega^2; \quad (5.2.4)$$

Будем считать, что при неподвижной оси тахометра расстояние между муфтами равно $2l$, а при вращающейся — $(2l - z_0)$, где z_0 — перемещение подвижной муфты (деформация пружины). Исходя из геометрических соотношений, можно записать:

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{4lz_0 - (z_0)^2}}{2l}; \quad (5.2.5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{4lz_0 - (z_0)^2}}{2l - z_0}; \quad (5.2.6)$$

Тогда выражение (5.2.4) принимает вид:

$$Q_{oc} = \frac{m}{2} (2l - z_0) \left(\frac{1}{2} + \frac{r_0}{\sqrt{4lz_0 - (z_0)^2}} \right) \omega^2; \quad (5.2.7)$$

Если пружина имела предварительную деформацию z_1 , то ее суммарное значение:

$$y = z_1 + z_0; \quad (5.2.8)$$

Подставляя эти выражения, получим уравнение характеристики чувствительного элемента тахометра:

$$k \frac{m}{2} (2l - z_0) \left(\frac{1}{2} + \frac{r_0}{\sqrt{4lz_0 - (z_0)^2}} \right) \omega^2 = c(z_1 + z_0); \quad (5.2.9)$$

Это выражение нельзя привести к традиционному виду характеристики преобразователя. Поэтому приходится использовать выражение характеристики вида:

$$\omega = A \sqrt{\frac{z_1 + z_0}{(2l - z_0) \left(1 + \frac{2r_0}{\sqrt{4lz_0 - (z_0)^2}} \right)}} ; \quad (5.2.10)$$

Характеристики центробежных тахометров не линейны. Поэтому в центробежных тахометрах применяют чувствительные элементы с подавленным начальным участком шкалы, что достигается за счет предварительного натяга противодействующей пружины, соответствующего выбора диапазона измерений и позволяет выбрать рабочий участок характеристики в ее средней части, наиболее близкой к линейному. На практике это обеспечивается созданием многодиапазонных приборов путем применения на входе тахометров коробок скоростей. Например, ручной центробежный тахометр ИО-10 имеет встроенную пятискоростную коробку передач с двумя группами диапазона измерений: 25—100; 75—300; 250—1000; 750—3000; 2500—10000 об/мин. Аналогичного класса тахометр ИО-30 имеет встроенную трехскоростную коробку передач.

Центробежные тахометры не имеют методических погрешностей. Им свойственны только инструментальные.

Появление инструментальных погрешностей обусловлено упругим гистерезисом и последствием противодействующей пружины, влиянием температуры на ее модуль упругости, погрешностей из-за трения в кинематических парах, а также неточностей изготовления и сборки.

Достоинство центробежных тахометров - простота конструкции при сравнительно высокой точности измерения, а также независимость показаний от направления вращения. Недостатки связаны с нелинейностью характеристики и с ограниченной дистанционностью измерения, которая определяется предельно допустимой длиной гибкого валика (2,5 м).

У различных конструкций центробежных тахометров предельная основная приведенная погрешность находится в пределах от ± 1 до ± 2 %.

5.3 Электрические тахометры

Электрические тахометры наряду с другими содержат в измерительной цепи электромеханические преобразователи. К числу электрических относятся электромашинные электроимпульсные и фотоэлектрические тахометры.

В электрических тахометрах измеряемая угловая скорость, преобразуется в постоянный, переменный или импульсный ток. В зависимости от рода тока и преобразователя, можно выделить электромашинные тахометры постоянного и переменного тока, электроимпульсные емкостные тахометры и счетно-импульсные тахометры.

Тахометр с электрическим генератором представляет собой сочетание генератора постоянного (рисунок 5.3.1) или переменного тока (рисунок 5.3.2) и вторичного электроизмерительного прибора.

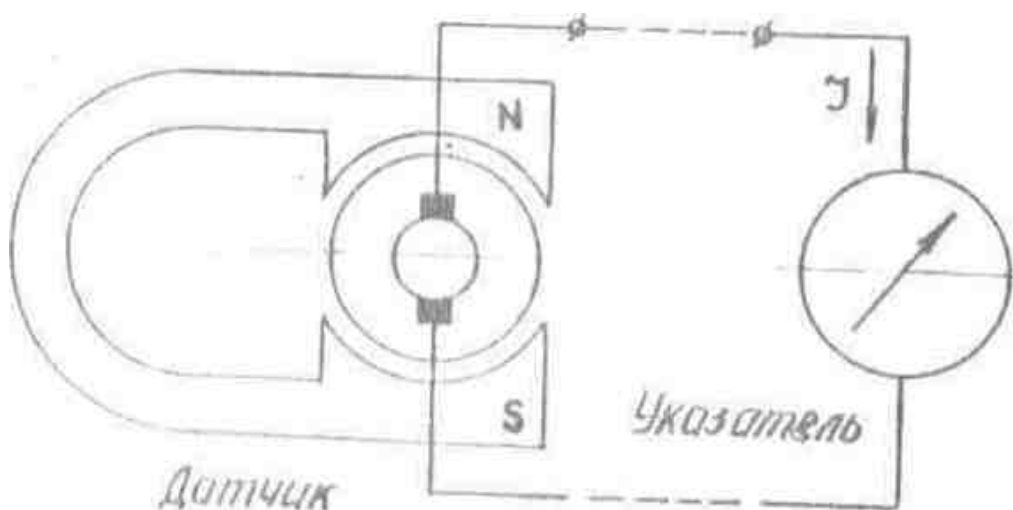


Рисунок 5.3.1- Генератор постоянного тока

Принцип действия электрического генератора заключается в том, что при движении проводника в магнитном поле возникает электродвижущая сила. Величина электродвижущей силы пропорциональна магнитной индукции, длине проводника и скорости его движения. При вращении ротора генератора постоянного тока в его обмотке наводится э.д.с.:

$$E = \frac{p\Phi N}{60a} n \cdot 10^{-8}; \quad (5.3.1)$$

где p – число пар полюсов (обычно $p=1$);

Φ – магнитный поток каждой пары полюсов;

N – число проводников обмотки ротора;

a – число параллельных ветвей обмотки ротора;

n – скорость вращения ротора генератора в об/мин;

E – электродвижущая сила генератора в в.

Значение э.д.с. генератора переменного тока:

$$E = \sqrt{2}\omega\Phi \frac{pn}{60} \cdot 10^{-8}; \quad (5.3.2)$$

где Φ – магнитный поток пары полюсов;

ω – число витков обмотки статора;

n – число оборотов ротора в минуту;

E – электродвижущая сила генератора в в.

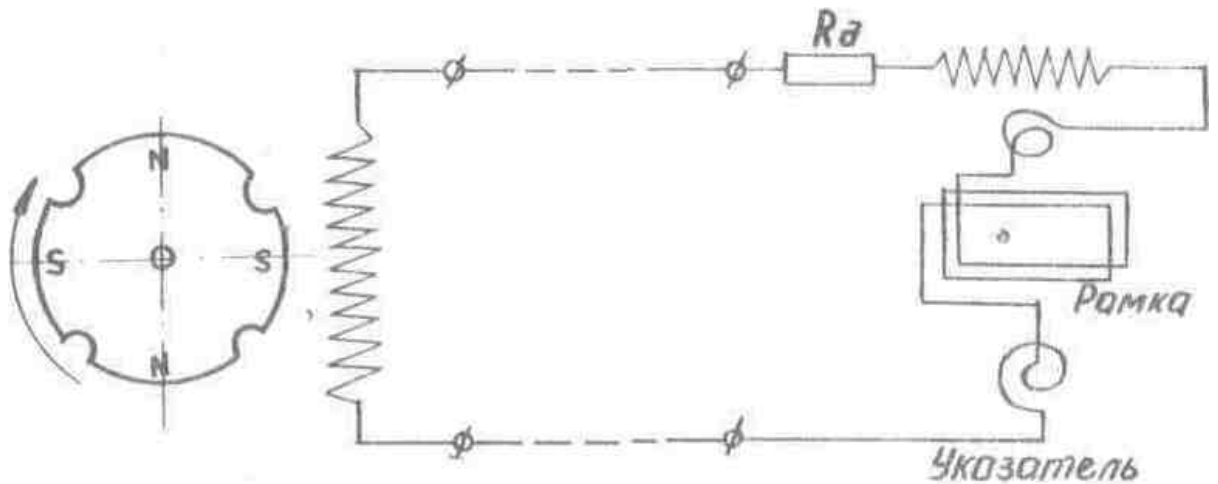


Рисунок 5.3.2- Генератор переменного тока

У электрических тахометров постоянного тока характеристика линейная, а у тахометров переменного тока – нелинейная. Тем не менее, более широкое применение получили электромашинные тахометры переменного тока. Их основное преимущество перед тахометрами постоянного тока состоит в том, что генератор переменного тока не имеет коллектора, благодаря чему тахометр лучше сохраняет свою первоначальную точность в процессе длительной работы.

Тахометры с электрическими генераторами в отличие от центробежных и магнитных дают возможность дистанционной передачи показаний, так как вторичный прибор может быть удален на значительное расстояние от места измерения. В авиации находят широкое применение электрические тахометры типа ТЭ. Дистанционный электрический тахометр типа ТЭ представляет собой сочетание синхронной передачи и указателя, аналогичного магнитоиндукционному тахометру (рисунок 5.3.3).

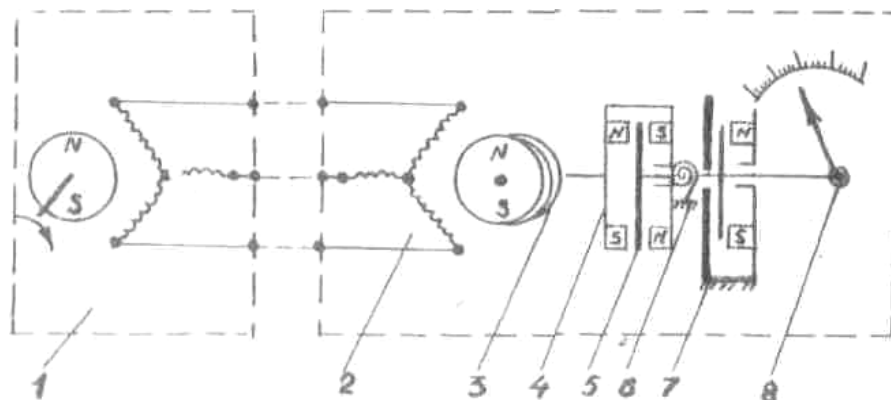


Рисунок 5.3.3- Дистанционный электрический тахометр

Датчиком синхронной передачи служит трехфазный генератор (1) с ротором в виде постоянного магнита. При вращении ротора в обмотках статора возникает переменный ток, частота которого соответствует угловой скорости ротора. Датчик связан трехпроводной линией с приемником (2), в котором

имеется синхронный электродвигатель. Для улучшения пусковых характеристик в роторе электродвигателя, кроме постоянных магнитов, установлены три стальных диска (3). Магниты посажены на ось ротора свободно и связаны с ней через пружину. Это обеспечивает быстрый переход вращения ротора электродвигателя из асинхронного в синхронный режим. На конце вала электродвигателя укреплен магнитный узел (4), содержащий шесть пар полюсов постоянных магнитов, между которыми расположен металлический диск (5) подвижной части указателя. В результате взаимодействия вращающегося магнитного узла с вихревыми токами в металлическом диске возникнет вращающий момент, пропорциональный измеряемой скорости. На одной оси с диском расположены: противодействующая спиральная пружина (6), индукционный успокоитель (7) и стрелка указателя прибора (8).

Дистанционные магнитные тахометры обладают сравнительно высокой точностью (погрешность не более 0,2-0,5%) имеют равномерную шкалу, достаточно надежны в работе.

5.4 Магнитные тахометры

На рисунке 5.4.1а дана принципиальная схема магнитоиндукционного узла, являющегося чувствительным элементом магнитного тахометра. С приводным валом тахометра жестко связаны постоянный магнит 1, магнитопровод 6 и термомагнитный шунт 5. Соосно с магнитом на отдельном валу установлен колпачок 2, изготовленный из немагнитного металла с малым электрическим сопротивлением. На этом же валу установлена стрелка 4 и закреплен один конец спиральной пружины 3, другой конец которой соединен с корпусом.

Принцип работы тахометра заключается в следующем. При вращении приводного вала магнитные силовые линии постоянного магнита пересекают колпачок, вследствие этого в материале последнего наводятся вихревые токи. Они, протекая по колпачку, создают электромагнитное поле, которое при взаимодействии с полем постоянного магнита вызывает появление движущего момента относительно оси колпачка, увлекающего его в направлении вращения магнита. Колпачок, а с ним и стрелка прибора поворачивается до тех пор, пока увлекающий момент не будет уравновешен противодействующим моментом пружины 3.

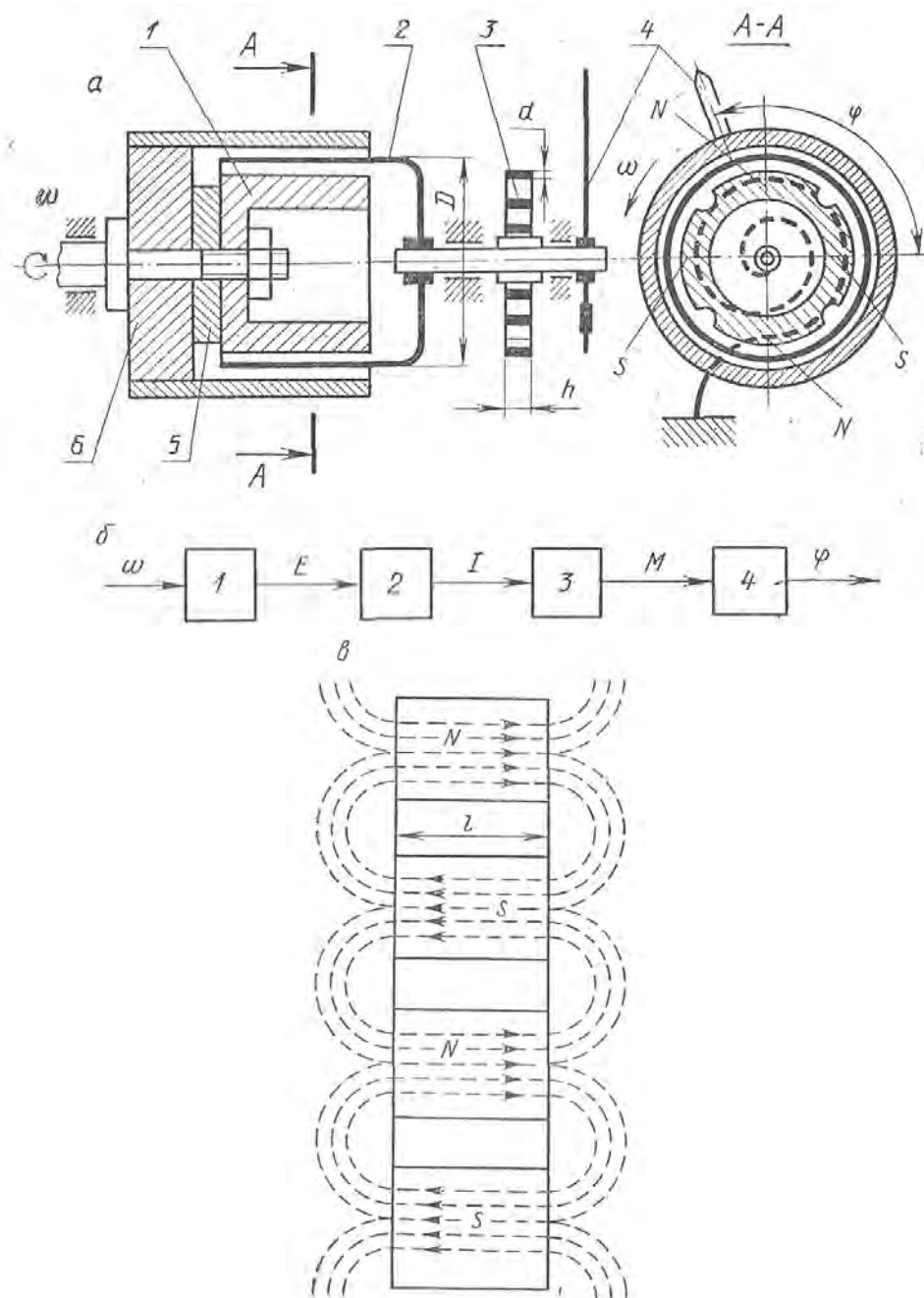


Рисунок 5.4.1 – Схема магнитного тахометра (а – схема магнитоиндукционного узла; б – структурная схема; в – развертка магнитного поля и контуров вихревых токов)

Увлекающий момент:

$$M_y = F \frac{D}{2} 2\rho; \quad (5.4.1)$$

где F - сила взаимодействия электромагнитного поля вихревых токов с полем постоянного магнита, действующая по касательной к цилиндрической поверхности кол-пачка, Н; D- диаметр магнита, м; 2ρ - число пар полюсов магнита.

Сила F, возникающая под каждым полюсом магнита

$$F = BlI; \quad (5.4.2)$$

где B — магнитная индукция, Тл; l — длина полюсов магнита, м; I — полный

ток под каждым полюсом магнита, А.

$$I = \frac{2E}{R}; \quad (5.4.3)$$

где E — электродвижущая сила, В; R — полное электрическое сопротивление контура тока, Ом.

На рисунке 5.4.1 в приведена развертка магнитного поля и контуров вихревых токов в теле колпачка. Из-за сложности определения формы контура тока и плотности его распределения расчет полного электрического сопротивления R затруднен. С этой целью вводится коэффициент k_c , учитывающий параметры распределения контуров тока.

$$R = k_c \frac{\rho}{\Delta}; \quad (5.4.4)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление материала колпачка, Ом · м; Δ — толщина стенки колпачка, м. Возникающая электродвижущая сила (В):

$$E = 2Blv; \quad (5.4.5)$$

Линейная скорость перемещения полюсов магнита относительно стенки колпачка v (м/с) связана с частотой вращения магнита n (об/мин) соотношением:

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{D}{2} \omega; \quad (5.4.6)$$

Решая совместно вышеприведенные уравнения, получаем формулу для определения увлекающего момента:

$$M_y = \frac{2B^2 l^2 D^2 \Delta \rho}{k_c \rho}; \quad (5.4.7)$$

Противодействующий момент ($H \cdot м$), создаваемый плоской спиральной пружиной прямоугольного поперечного сечения:

$$M_{np} = \frac{Ebh^3}{12L} \alpha; \quad (5.4.8)$$

где E — модуль упругости материала пружины, Па; b , h , L — ширина, толщина и длина пружины, м; α — угол закручивания пружины, равный углу поворота оси колпачка.

При установившейся скорости вращения увлекающий момент уравновешивается противодействующим моментом пружины $M_y = M_{np}$ и характеристика тахометра:

$$\alpha = \frac{12B^2 l^2 D^2 \Delta \rho L}{k_c \rho E b h^3} \omega; \quad (5.4.9)$$

Магнитный тахометр имеет линейную характеристику, так как при неизменных внешних условиях все параметры постоянны. Поэтому можно записать:

$$\alpha = k\omega; \quad (5.4.10)$$

где k - коэффициент пропорциональности, характеризующий конструктивные и электрические параметры тахометра.

Благодаря линейной характеристике и значительному закручиванию спиральной пружины (до 3—3,5 оборотов) шкалы магнитных тахометров можно выполнять многооборотными и двухстрелочными.

С целью получения устойчивых показаний, особенно при малой частоте вращения, необходимо обеспечить достаточно большой увлекающий момент. Для этого, как видно из зависимости, необходимо, чтобы магнит имел большую индукцию и материал колпачка обладал малым удельным электрическим сопротивлением. Увеличение числа пар полюсов постоянного магнита не вызывает значительного повышения увлекающего момента, так как одновременно подрастает коэффициент k_c .

Магнитному тахометру присуща температурная погрешность, связанная с изменением магнитной индукции постоянного магнита, модуля упругости пружины и удельного электрического сопротивления материала колпачка. С повышением температуры индукция магнитных материалов уменьшается, электрическое сопротивление увеличивается, и модуль упругости снижается. Результирующее влияние этих факторов может скомпенсировать суммарную погрешность показаний тахометра. Поэтому теоретически возможно за счет соответствующего подбора температурных коэффициентов этих параметров свести к нулю возникающие температурные погрешности. Однако реализация, на практике этого метода компенсации температурной погрешности связана с большими трудностями. В конструкциях тахометров реализуется другой метод компенсации, основанный на применении термомагнитного шунта.

Простота конструкции, относительно высокая степень линейности характеристики, возможность использования в условиях вибрации и тряски, независимость показаний от положения чувствительного элемента позволяют широко использовать магнитные тахометры в различных областях науки и техники.

Тахометры магнитоиндукционного типа являются по существу стационарными приборами. Вал тахометра должен быть связан напрямую с объектом измерения или с помощью гибкого валика.

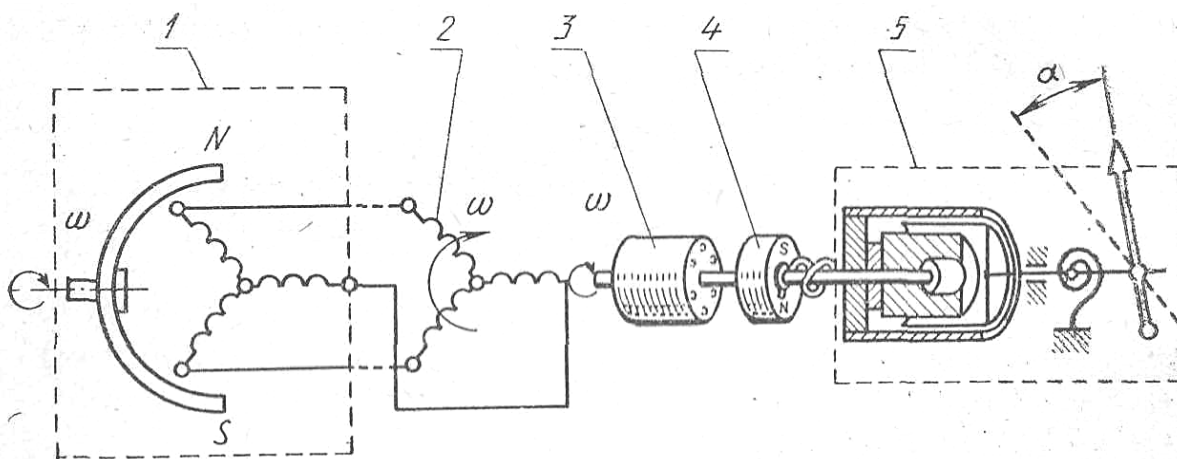


Рисунок 5.4.2- Тахометр с электрической связью типа ТЭ

Для обеспечения дистанционного измерения применяют электрическую передачу от объекта измерения или тахометрического узла (так называемый электрический вал).

На рисунке 5.4.2 приведена схема тахометра с электрической связью типа ТЭ. Система электрической передачи включает в себя трехфазный генератор 1, ротор которого выполнен в виде постоянного магнита и приводится во вращение от объекта измерения, и синхронный двигатель 2. Статор двигателя питается от трехфазного генератора, а ротор связан с валом магнитного тахометрического узла.

При вращении ротора генератора его магнитное поле наводит в трехфазной обмотке статора ЭДС, частота которой пропорциональна частоте вращения ротора. Это напряжение по линии связи передается в статорную обмотку синхронного трехфазного электродвигателя, создавая в статоре вращающееся магнитное поле. Взаимодействуя с ротором, представляющим собой постоянный магнит, это поле приводит его во вращение. С целью обеспечения запуска и синхронизации ротора применена схема асинхронного запуска двигателя, для чего на валу ротора установлен дополнительно короткозамкнутый ротор 3. Чтобы облегчить вхождение ротора в синхронизм, его постоянные магниты 4 посажены на вал свободно, а крутящий момент передается от магнитов на вал через спиральную пружину. С валом двигателя соединен магнитоиндукционный узел 5, аналогичный чувствительному элементу одного из описанных ранее магнитных тахометров, связанный с одно- или двухстрелочным указателем и индукционным демпфером. Основная погрешность комплекта таких тахометров находится в пределах $\pm 0,5 \dots \pm 1,5 \%$.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ

6.1 Общие сведения о тахометрах, работающих бесконтактным методом

Бесконтактные методы измерения угловых скоростей применяются в тех случаях, когда мощность объекта контроля настолько мала, что подключение любого потребителя мощности в виде тахометра, работающего контактным методом, может вызвать перегрузку и исказить измеряемую скорость. Кроме этого, на практике зачастую необходимо измерять угловую скорость объектов, расположенных в труднодоступных, но видимых местах, что также требует использования бесконтактных методов, контроля. Из числа таких тахометров наибольшее распространение в практике технических измерений получили электрические счетно-импульсные и стробоскопические тахометры.

6.2 Электрические счетно-импульсные тахометры

Структурная схема счетно-импульсного тахометра приведена на рисунке 6.2.1. Первичный преобразователь импульсов вырабатывает импульсы электрического тока, частота которых равна или кратна частоте вращения контролируемого вала. В качестве первичного преобразователя могут применяться фотоэлектрические, индуктивные, емкостные, радиоактивные и другие преобразователи.

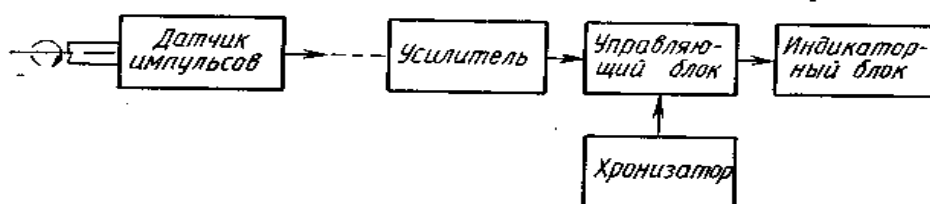


Рисунок 6.2.1- Структурная схема счетно-импульсного тахометра

С первичного преобразователя (модулятора) импульсы попадают на усилитель, где они усиливаются, а затем подаются на управляющий блок. К нему также поступают импульсы от хронизатора. Последний представляет собой кварцевый генератор с делителями частоты, который подает на управляющий блок импульсы отсечки частотой 0,5 или 1 Гц. Управляющий блок пропускает на индикаторный блок импульсы от преобразователя между двумя последовательными импульсами отсечки. В индикаторном блоке происходит счет импульсов, а также выдача сигнала на цифровое показывающее или регистрирующее устройство. Показание тахометра сохраняется в течение

5—15 с, после чего управляющая система снимает отсчет и подготавливает индикаторный блок к новому отсчету, который начинается после очередного импульса отсечки хронизатора.

Погрешность счетно-импульсного тахометра обычно очень мала и определяется точностью выдачи импульсов отсечки от хронизатора и точностью счетного устройства. Относительная погрешность некоторых моделей составляет ± 1 импульс в секунду.

6.3 Стробоскопические тахометры

Стробоскопический эффект может быть достигнут путем освещения контролируемого объекта периодическими кратковременными вспышками света. В этом случае условие кажущейся остановки вращающегося объекта имеет место при $n = if$, где n — частота вращения контролируемого вала, с^{-1} ; i - любое целое число, характеризующее кратность синхронизма; f - частота следования вспышек света, Гц.

Когда выдерживается условие $f = in$, то имеет место кратный синхронизм с неподвижной картиной множественного (двойного, тройного и т. д.) изображения контролируемого объекта. Это объясняется тем, что при каждом обороте вала наблюдаемая на нем точка фиксируется глазом в нескольких положениях, создавая впечатление неподвижности множественного изображения. Аналогичные картины могут возникать в тех случаях, когда отношение f / n представляет собой отношение целых чисел, не имеющих общего множителя. К примеру, при $f = 60$ Гц и $n = 40$ с их отношение равно $3/2$. Тогда вместо одной точки в действительности наблюдатель будет видеть три равнорасположенных по окружности точки контролируемого объекта.

Из принципа возникновения стробоскопического эффекта понятно, что эффективность его использования определяется четкостью и контрастностью наблюдаемой неподвижной картины. Это условие обеспечивается соотношением интенсивности световых вспышек и постоянной освещенности объекта. При этом следует принимать во внимание контрастную чувствительность глаза, которая зависит от частоты следования и интенсивности световых импульсов. Для получения четкого изображения контролируемого объекта необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\tau \leq \frac{\delta}{\pi d n}; \quad (6.3.1)$$

где τ — длительность светового импульса, с; δ — приращение ширины наблюдаемого объекта, м; d — диаметр вала, м; n — частота вращения вала, об/с. При этом δ не должна превышать долей миллиметра.

Помимо этого, при измерении должно выдерживаться определенное соотношение между длительностью светового импульса t и интервалом между двумя последовательными импульсами

$$t_{\text{инт}}: \frac{\tau}{t_{\text{инт}}} \leq 0,05; \quad (6.3.2)$$

Очевидно, что точность измерения стробоскопическим тахометром в первую очередь зависит от точности задания и поддержания частоты следования: световых импульсов. Поэтому в электронных строботахометрах применяют генераторы с кварцевыми или камертонными осцилляторами, которые обеспечивают высокую точность следования световых импульсов, а следовательно, более высокую точность измерения по сравнению с механическими, где в качестве стабилизаторов применяются центробежные регуляторы.

Большой точностью (основная погрешность не превышает $\pm 0,5\%$ отсчета) характеризуются электронные строботахометры с импульсными лампами, которые питаются от специальных, чаще всего релаксационных, генераторов со ступенчатым и плавным регулированием частоты. Например, строботахометр модели СТ-5 предназначен для точных измерений скоростей вращения или колебаний движущихся деталей машин и аппаратов, а также для изучения особенностей их движения и работы. Строботахометр СТ-5 имеет пределы измерения от 250 до 32 000 об/мин на семи диапазонах: 250—500, 500—1000, 1000—2000, 2000—4000, 4000—8000; 8000—16000, 16000—ЭЮ00 об/мин.

7. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАКОНАХ ИЗЛУЧЕНИЯ

В основу работы пирометров излучения положены законы, связывающие температуру тел с интенсивностью их излучения. Поэтому прежде, чем перейти к характеристике приборов, рассмотрим основные законы излучения и теоретические предпосылки их использования в пирометрах.

Под **излучением** понимается процесс передачи энергии от одного тела другому посредством электромагнитных волн. Все нагретые физические тела являются источниками тепловых лучей. При температуре порядка 500—600°С они начинают испускать электромагнитные волны, видимые человеческим глазом, т. е. свет. Видимое излучение характеризуется весьма узким частотным диапазоном колебаний с длиной волн от 0,4 до 0,75 мкм. Излучения с длиной волн, большей 0,75 мкм и меньшей 0,4 мкм, являются невидимыми и относятся в первом случае к инфракрасному, а во втором — к ультрафиоле-

товому участкам спектра. В практике температурных измерений используют главным образом диапазон инфракрасных и видимых лучей.

Испускательной способностью или спектральной плотностью энергетической светимости тела называется физическая величина, численно равная отношению энергии dE , излучаемой в единицу времени с единицы площади поверхности тела в узком интервале длин волн в вакууме от λ до $\lambda+d\lambda$ (или частот от ν до $\nu+d\nu$), к ширине этого интервала:

$$r_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}; \quad (7.1)$$

$$r_\nu = \frac{dE}{d\nu}; \quad (7.2)$$

$$r_\lambda = \frac{C}{\lambda^2} r_\nu; \quad (7.3)$$

где C — скорость света в вакууме.

Значения r_λ и r_ν зависят от длины волны, температуры и физико-химических характеристик тела.

Энергетической светимостью тела называется физическая величина R_E , численно равная энергии электромагнитных волн всевозможных частот от нуля до бесконечности, излучаемых в единицу времени с единицы площади поверхности:

$$R_E = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda = \int_0^\infty r_\nu d\nu; \quad (7.4)$$

Если на физическое тело падает поток энергии E , то некоторая его часть E_a будет поглощена телом, часть E_R отражена от его поверхности и, наконец, только часть потока E_c будет пропущена телом. Отношение каждой составляющей к суммарному потоку энергии называется соответственно: $E_a/E = \alpha$ — коэффициентом поглощения; $E_R/E = \beta$ — коэффициентом отражения; $E_c/E = \tau$ — коэффициентом пропускания тела ($\alpha + \beta + \tau = 1$).

Аналогичные коэффициенты используются для характеристики монохроматического лучистого потока, т. е. для излучения с определенной длиной волны. Важно отметить, что для одного и того же физического тела при неизменном его состоянии значения этих коэффициентов для различных длин волн могут значительно отличаться, что характеризует избирательную способность тела к поглощению и пропусканию излучений с различными частотами.

Тело принято называть абсолютно черным, если оно полностью поглощает падающее на него излучение во всем спектре независимо от направления падения излучения, его спектрального состава и поляризации, ничего не отражает и не пропускает, т. е. имеет коэффициент поглощения $\alpha = 1$. В природе таких тел нет, хотя некоторые материалы близки к абсолютно черным. На-

пример, поглощательная способность графита в порошке составляет 95% от поглощательной способности абсолютно черного тела.

Серым телом называется тело, поглощательная способность которого во всем спектре длин волн одинакова.

Кирхгоф впервые установил, что испускательная способность тел пропорциональна их коэффициентам поглощения, причем, что остается справедливым как для полного, так и для монохроматического излучений. Следовательно, чем выше коэффициент поглощения тела, тем большей испускательной способностью оно обладает. Так как наибольшую поглощающую способность имеет абсолютно черное тело, то, следовательно, и его испускательная способность наибольшая.

Для характеристики испускательной способности реальных тел используется интегральная степень черноты тела («коэффициент черноты») $\varepsilon = R_E / R_E^*$. Аналогично, для монохроматического излучения с длиной волны λ — монохроматический коэффициент поглощения тела $\varepsilon_{\lambda} = r_{\lambda} / r_{\lambda}^*$, где R_E и r_{λ} — энергетическая светимость и испускательная способность реального тела; R_E^* и r_{λ}^* — энергетическая светимость и испускательная способность абсолютно черного тела.

Все методы оптической пирометрии основываются на законах излучения абсолютно черного тела.

Так, закон Стефана — Больцмана связывает энергетическую светимость абсолютно черного тела с его абсолютной температурой следующим выражением: $R_E^* = \sigma T^4$, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — постоянная Стефана — Больцмана.

Реальное тело, имеющее коэффициент черноты ε при той же температуре, будет обладать меньшей энергетической светимостью

$$R_E = \varepsilon \sigma T^4 < R_E^*; \quad (7.5)$$

Закон Стефана — Больцмана положен в основу радиационной пирометрии, а приборы, измеряющие температуру тела по его суммарному тепловому излучению, называются радиационными пирометрами или пирометрами полного (суммарного) излучения. Градуировка этих пирометров осуществляется по излучению абсолютно черного тела, поэтому при измерении температуры реальных тел из-за их меньшей излучающей способности прибор показывает некоторую заниженную температуру. Эта температура T_p , называемая радиационной, численно равна истинной температуре черного тела, при которой его энергетическая яркость B_E^* равна энергетической яркости рассматриваемого тела B_E .

Поскольку энергетическая яркость для источников, излучающих одинаково во всех направлениях, связана с его энергетической светимостью и испускательной способностью соотношениями:

$$B_E = R_E / \pi; \quad (7.6)$$

$$b_\nu = r_\nu / \pi; \quad (7.7)$$

$$\text{и } b_\lambda = r_\lambda / \pi; \quad (7.8)$$

где B_E , b_ν и b_λ — энергетическая яркость и ее спектральные плотности соответственно, то можно записать:

$$B_E = B_E^*; \quad (7.9)$$

$$\text{и } \varepsilon \sigma T^4 = \sigma T^4 p; \quad (7.10)$$

Тогда истинная температура реального тела по показаниям измеренной его радиационной температуры:

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}; \quad (7.11)$$

Из анализа последнего выражения видно, что $\sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}} > 1$, так как $\varepsilon < 1$. Значит, радиационная температура реального тела всегда меньше его истинной температуры. Очевидно, разность этих температур зависит от того, насколько отличается коэффициент черноты реального тела от единицы. Она представляет собой методическую погрешность измерения, которая возрастает с повышением измеряемой температуры.

Формула Планка связывает испускательную монохроматическую способность абсолютно черного тела с его температурой:

$$r_\lambda^* = 2\pi C^2 h \lambda^{-5} (e^{hc/\lambda kT} - 1)^{-1}; \quad (7.12)$$

где $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц — постоянная Планка; $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Эта зависимость положена в основу работы яркостных (оптических монохроматических) пирометров. Яркостные пирометры измеряют яркостную температуру тела.

Яркостной температурой T_λ тела называется температура абсолютно черного тела, при которой спектральная плотность его энергетической яркости b_λ^* для какой-нибудь определенной длины волны λ_0 равна спектральной плотности энергетической яркости данного тела для той же длины волны, т. е.

$$b_\lambda(\lambda_0, T) = b_\lambda^*(\lambda_0, T_\lambda); \quad (7.13)$$

Обычно ее определяют для $\lambda_0=655$ нм (красный свет).

Энергия излучения абсолютно черного тела по спектру излучения распределена неравномерно: в области очень малых и очень больших частот оно почти не излучает. По мере повышения температуры максимум испускательной способности смещается в сторону коротких длин волн в соответствии с законом смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}; \quad (7.14)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м·К — постоянная Вина.

Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела

$$r_{\lambda}^* = \frac{C}{\lambda^2} r_v; \quad (7.15)$$

от длины волны λ показана на рис.3.1, где $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$.

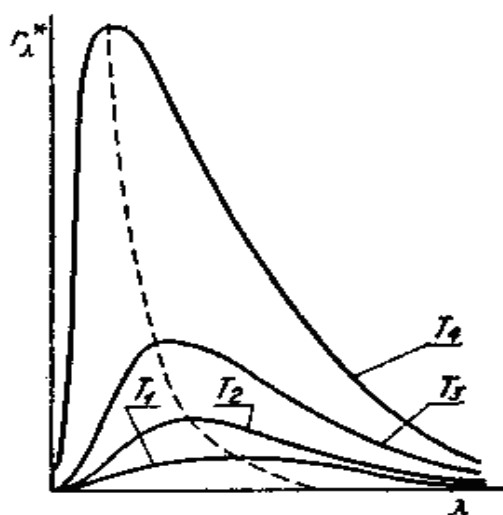


Рисунок 7.1 – Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела от длины волны λ и температуры T

Из закона смещения Вина и формулы Планка вытекает, что отношение спектральных плотностей энергетических яркостей

$$\frac{b_{\lambda}(\lambda_1, T)}{b_{\lambda}(\lambda_2, T)}; \quad (7.16)$$

для двух длин волн λ_1 и λ_2 зависит от температуры, так как она определяет распределение энергии в спектре излучения черного тела. Поэтому значение этого отношения может быть использовано как мера контролируемой температуры. Пирометры, в которых используется это свойство, называются цветовыми или пирометрами спектрального отношения. Ниже приведена зависимость отношения

$$\frac{b_{\lambda}(\lambda_1, T)}{b_{\lambda}(\lambda_2, T)}; \quad (7.17)$$

для $\lambda_1=0,65$ мкм $\lambda_2=0,47$ мкм, т.е. для длин волн, соответствующих красному и синему излучениям, которые обычно используются в цветовых пирометрах:

T, К	1200	1600	2000	2400	2800	3200
$\frac{b_\lambda(\lambda_1, T)}{b_\lambda(\lambda_2, T)}$	279,0	94,0	14,9	7,1	4,2	2,8

Так как цветовые пирометры градуируются по абсолютно черному телу, то их показания при измерении температуры реального тела отличаются от ее истинного значения, и температура, фиксируемая на шкале, называется цветовой. Под цветовой температурой реального тела $T_{ц}$, имеющего истинную температуру T , понимают такую температуру абсолютно черного тела, при которой относительные распределения спектральной плотности яркости черного тела b_λ^* и рассматриваемого тела b_λ максимально близки в видимой области спектра:

$$\frac{b_\lambda(\lambda_1, T)}{b_\lambda(\lambda_2, T)} = \frac{b_\lambda^*(\lambda_1, T_{ц})}{b_\lambda^*(\lambda_2, T_{ц})}, \quad (7.18)$$

Используя формулу Планка, можно показать, что

$$\ln \frac{b_\lambda(\lambda_1, T)}{b_\lambda(\lambda_2, T)} = \frac{1}{T_{ц}} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) C_2 + 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad (7.19)$$

где $C_2 = hc/k = 0.014388$ м·К – вторая радиационная постоянная.

У серых тел спектральная плотность яркости не зависит от длины волны, и поэтому для них цветовая температура равна истинной и может быть найдена из закона смещения Вина. Серые тела часто встречаются в практике пирометрии. Это металлы, покрытые пленками окислов, керамика, огнеупорные изделия, графит.

7.1 Устройство и работа радиационных пирометров

В общем случае радиационный пирометр состоит из следующих основных элементов: телескопа, приемника излучения и вторичного прибора.

Телескоп с помощью линзы объектива или вогнутого зеркала обеспечивает фокусирование излучения от нагретого тела на приемник. В качестве приемника излучения используются термопары, термобатарей, болометры (металлические и полупроводниковые), биметаллические спирали и др. Наибольшее распространение получили пирометры с термобатарей, представляющими несколько последовательно соединенных термопар.

Излучение, будучи сфокусированным на рабочих спаях термопар, нагревает их, в результате чего развивается тэдс, измеряемая с помощью вторич-

ных приборов. К термобатарей как приемникам излучения в пирометрах предъявляются следующие требования: они должны быть малогабаритными, развивать возможно большую тэдс, обеспечивать малую инерционность. Для повышения тэдс увеличивают площадь поверхности рабочих спаев термопар, расплющивая термоэлектроны или припаивая к ним тонкие пластинки, а для повышения коэффициента поглощения рабочие концы термопар чернят

Вторичными приборами в радиационных пирометрах служат пирометрические милливольтметры и электронные потенциометры, шкалы которых проградуированы в градусах температуры получения (яркостная, цветовая и радиационная).

Количество лучистой энергии, попадающей на объектив телескопа, определяется не только температурой контролируемого тела, но и его размерами, а также расстоянием между ним и телескопом. Чтобы обеспечить независимость показаний от размеров объекта и степени его удаленности, в телескопах предусматривается диафрагма поля зрения, с помощью которой ограничивается телесный угол визирования. В зависимости от этого угла телескопы радиационных пирометров разделяются на широкоугольные, узкоугольные и остроугольные. При ограничении угла визирования на термобатарей поступает излучение только с небольшого участка нагретого тела, за пределами которого излучение не фиксируется, чем и обеспечивается независимость показаний от размеров излучателя. С увеличением расстояния между прибором и объектом измерения площадь его поверхности, ограниченной полем визирования, возрастает примерно пропорционально квадрату этого расстояния, а количество лучистой энергии, попадающей на приемник с единицы площади нагретой поверхности измеряемого тела, уменьшается пропорционально квадрату расстояния между пирометром и контролируемым объектом. Суммарное влияние этих факторов должно обеспечить независимость показаний прибора от степени удаленности объекта, хотя на практике полная компенсация не достигается, что обуславливает наличие дополнительных погрешностей.

При измерении быстро меняющихся температур необходимо, чтобы приемник обладал возможно меньшей инерционностью. Термическая инерционность радиационных пирометров оценивается интервалом времени с момента облучения телескопа, имеющего температуру 20°C , до того момента, когда развиваемая приемником тэдс достигает значения, на 2% отличающегося от тэдс, соответствующей измеряемой температуре. В зависимости от этого телескопы радиационных пирометров согласно ГОСТ 6923—68 разделяются на малоинерционные (инерционность менее 0,5 с); со средней инерционностью (от 0,5 до 2 с); с большой инерционностью (свыше 2с).

Наименьшая инерционность может быть достигнута в телескопах, у которых в качестве приемников излучения используются полупроводниковые болометры.

Радиационные пирометры, включая и вторичные приборы, должны быть взаимозаменяемы по их градуировочной характеристике. Установлены четыре градуировочные таблицы: гр. РК-15 (от 400 до 1500 °С); гр. РК-20 (от 600 до 2000 °С); гр. РС-20 (от 900 до 2000 °С) и гр. РС-25 (от 1200 до 2500°С). Кроме того, существует широкоугольный объектив градуировки Р-5 с оптикой из фтористого лития для измерения температур в инфракрасной области (от 100 до 500 °С). В настоящее время разработано много конструкций радиационных пирометров, отличающихся по ряду признаков, основным из которых является интервал температур, для измерения которых предназначен прибор.

На рисунке 7.1.1 показано конструктивное исполнение узкоугольного телескопа ТЕРА-50. Его основными частями являются: массивный металлический корпус 1 с диафрагмой 2; объектив, состоящий из стеклянной или кварцевой линзы 3, фокусирующей изображение контролируемого объекта на термобатарее 5. На фланец с резьбовой частью навинчивается диафрагма 4, ограничивающая угол визирования телескопа. При градуировке с помощью трубки 10 диафрагму перемещают вдоль резьбового хвостовика, подгоняя тэдс термобатарей до градуировочного значения. Вблизи холодных спаев термобатарей помещается терморезистор 9 из медной проволоки, который уменьшает влияние изменений температуры телескопа на его показания.

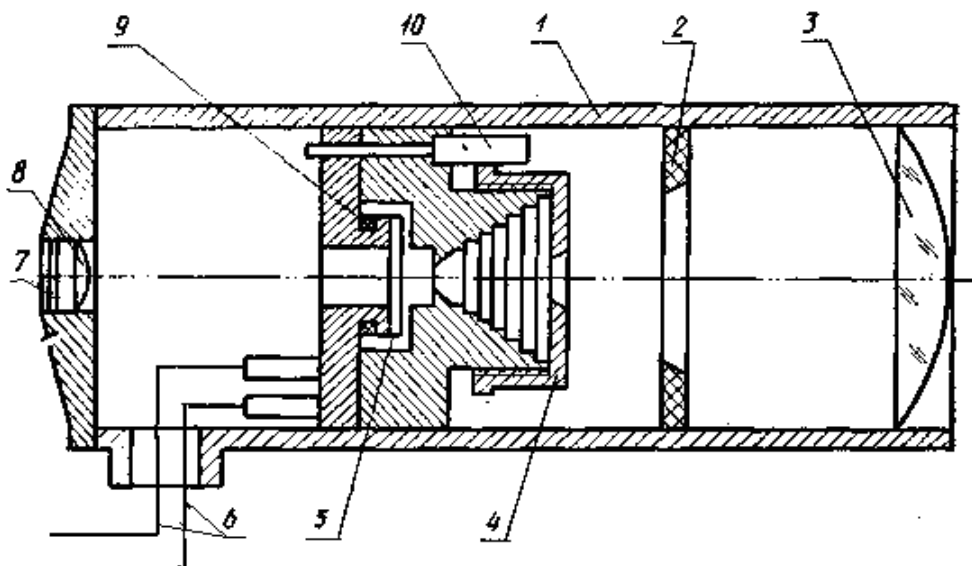


Рисунок 7.1.1 – Схема радиационного пирометра

На передней стенке корпуса расположен окуляр, состоящий из линзы 8 и защитного стекла 7, которое предохраняет глаз наблюдателя при большой яр-

кости визируемого объекта. Термобатарея подключается к вторичному прибору с помощью соединительных проводов б.

Радиационным пирометрам присущи как методические, так и инструментальные погрешности. Источниками первых являются отличия коэффициента черноты контролируемого тела от абсолютно черного, потери лучистой энергии в промежуточной среде и зависимость показаний пирометра от размеров излучателя и удаленности его от телескопа. Из числа инструментальных следует отметить погрешности, обусловленные отклонением характеристики пирометра от стандартной градуировочной таблицы, отклонением температуры телескопа от нормальной ($+20^{\circ}\text{C}$), а также погрешности вторичных приборов.

При контроле температуры тел, близких по своей излучающей способности к абсолютно черному телу, основная погрешность измерения температуры с помощью радиационных пирометров не превышает 1% от верхнего предела измерения.

7.2 Устройство и работа яркостных пирометров

В основу действия яркостных пирометров положена зависимость монохроматической яркости абсолютно черного тела от его температуры, которая описывается законами Вина и Планка. Измерение температуры с помощью этих пирометров сводится к сравнению яркости излучения контролируемого тела с яркостью градуированного источника излучения, находящегося в пирометре, в узком участке спектра излучения.

На рисунке 7.2.1 представлена принципиальная схема яркостного визуального пирометра (пирометра с «исчезающей нитью»).

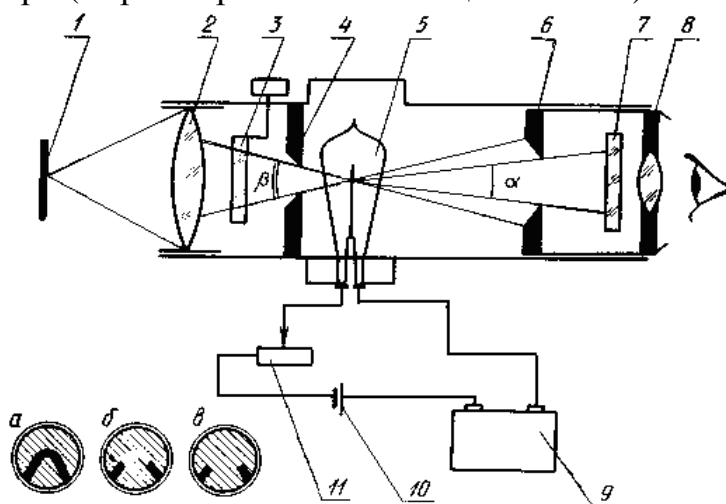


Рисунок 7.2.1 – Схема яркостного пирометра

Излучение от контролируемого объекта 1 с помощью линзы 2 объектива фокусируется в плоскости нити накаливания пирометрической лампы 5. Наблюдая через окуляр 8 и красный светофильтр 7, оператор видит нить на-

кала лампы на фоне изображения контролируемого объекта. Пирометрическая лампа включена в электрическую цепь, состоящую из источника тока *10*, реостата *11*, регистрирующего прибора *9*. Изменяя реостатом силу тока, проходящего через пирометрическую лампу, оператор плавно изменяет яркость нити лампы. Если яркостная температура нити ниже яркостной температуры объекта, то нить видна темной на фоне объекта (рисунок 7.2.1, а); если температура нити выше температуры объекта, то нить ярче объекта (рисунок 7.2.1, б). При равенстве ее видимой яркости с яркостью контролируемого объекта нить лампы на фоне изображения излучателя не видна (рисунок 7.2.1, в), что свидетельствует о равенстве их яркостной температуры. Определив заранее зависимость между силой тока, проходящего через лампочку, и яркостной температурой последней по показаниям регистрирующего прибора, находят яркостную температуру измеряемого тела.

В пирометре применены две диафрагмы *4* и *6*, которые ограничивают входной β и выходной α углы прибора. Значения этих углов выбираются исходя из диаметра нити лампы, ее формы и сечения. Красный светофильтр *7* применен для выделения узкого спектрального интервала (шириной примерно 100 им), при котором происходит сравнение яркостей. Чтобы избежать перегрева нити лампы, ее нагревают не выше яркостной температуры 1500°С, а при измерении более высоких температур яркость контролируемого объекта ослабляют путем установки между ним и лампой поглощающего стекла *3* серого цвета.

В яркостных пирометрах применяются лампы с вольфрамовой нитью накаливания. С повышением силы тока в лампе соответственно возрастает ее температура и как следствие увеличиваются сопротивление и напряжение на ее зажимах. Очевидно, каждый из этих параметров может служить мерой ее яркостной температуры. В соответствии с этим существуют пирометры, и которых для измерения указанных величин применяются различные вторичные приборы: амперметры, включенные с лампой последовательно, вольтметры, контролирующие напряжение, логометры и мосты, фиксирующие изменение сопротивления лампы.

Пирометры с «исчезающей нитью» ОППИР-017 используются для измерения температуры от 800 до 6000 °С и в зависимости от пределов измерения имеют три разновидности. Кроме того, каждый прибор снабжен двумя шкалами с различными пределами измерений.

Прибор ОППИР-017 состоит из следующих узлов: оптической системы, включающей в себя объектив, окуляр, красный светофильтр, две диафрагмы и поглощающий светофильтр; пирометрической лампы с дугообразной нитью накаливания, включенной последовательно с регулировочным реостатом и

встроенным показывающим прибором, в качестве которого применен дифференциальный амперметр. К нему в комплекте прилагаются два последовательно включенных щелочных аккумулятора с напряжением от 2 до 2,6 В.

Применяемые в пирометрах ОППИР-017 пирометрические лампы не взаимозаменяемы, поэтому при каждой смене лампы требуется индивидуальная градуировка прибора. Регулировочный реостат выполнен в виде кольца и установлен в крышке корпуса.

Яркостным пирометрам присущи методические и инструментальные погрешности. Появление первых обусловлено отличием характера излучения контролируемого тела от абсолютно черного, поглощением лучистой энергии в промежуточной среде, ошибкой наблюдателя при уравнивании яркостей. Инструментальные погрешности возникают из-за отклонения температуры прибора от нормальной (20°C), изменения градуировочной характеристики пирометрической лампы, отклонения параметров красного светофильтра от установленных стандартом и изменения пирометрического ослабления поглощающего стекла от стандартного значения. Основная допустимая погрешность измерения зависит от диапазона температур и составляет $\pm 20^{\circ}\text{C}$ (при пределах измерения $800\text{—}1400^{\circ}\text{C}$) и $\pm 30^{\circ}\text{C}$ (при пределах измерения $1200\text{—}2000^{\circ}\text{C}$).

7.3 Устройство и работа цветowych пирометров

На рисунке 7.3.1 представлена блок-схема цветowego фотоэлектрического пирометра ЦЭП-3, который предназначается для измерения и регистрации цветowych температур в диапазоне от 1400 до 2800°C .

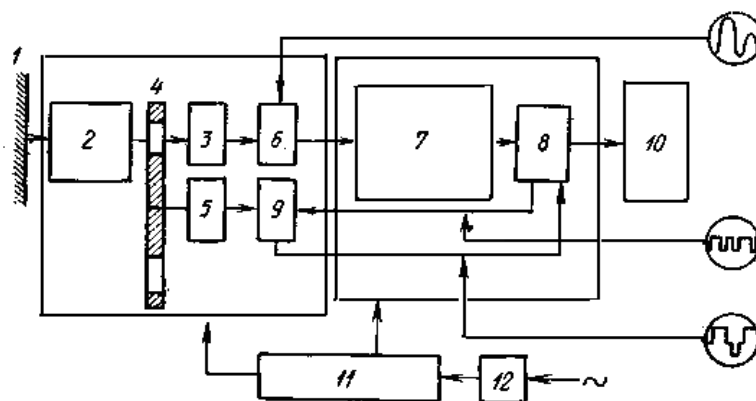


Рисунок 7.3.1 – Схема цветowego пирометра

Излучение от контролируемого объекта 1 проходит через объектив 2 и попадает на фотоэлемент 3. Между фотоэлементом и объективом установлен обтюратор 4, представляющий собой вращающийся диск с двумя отверстиями, в которых установлены красный и синий светофильтры. Обтюратор получает вращение от синхронного электродвигателя 5. При такой конструк-

ции фотоэлемент поочередно освещается красным и синим светом, в результате чего в его цепи возникают импульсы, тока, амплитуда которых пропорциональна спектральным плотностям яркостей потоков синего и красного света. Эти импульсы, пройдя предварительный усилитель 6, попадают в преобразователь 7, в котором они преобразуются в импульсы прямоугольной формы с одинаковой амплитудой, но разной длительности. При этом длительность импульсов пропорциональна логарифмам амплитуд первоначальных импульсов, формируемых в фотоэлементе. Далее импульсы проходят в предварительные каскады выходного усилителя 8, откуда поступают в установленный на валу обтюратора коллекторный переключатель 9. Этот переключатель сообщает прямоугольным импульсам, соответствующим красному и синему излучению, противоположную полярность. Постоянная составляющая сигнала вследствие пропорциональна разности средних значений этих импульсов и соотношений логарифму отношения амплитуд первоначальных импульсов, т.е, спектральных плотностей яркостей, соответствующих красному и синему излучению. Как было показано формуле (3.3), это отношение пропорционально цветовой температуре. Для измерения постоянной составляющей напряжения в пирометре применен автоматический электронный потенциометр 10, шкала которого градуируется в градусах цветовой температуры. Весь диапазон измерения разбивается на пять-шесть поддиапазонов, переход на которые обеспечивается сменой диска обтюратора со светофильтрами различной плотности.

В качестве приемника излучения используется фотоэлемент СЦВ-3, который термостатируется при 40 °С. Допустимое значение основной погрешности пирометра составляет $\pm 1\%$ от верхнего предела измерения каждого диапазона.

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока через стабилизатор напряжения 12 и блок питания 11.

8. ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ С ТЕРМОРЕЗИСТОРАМИ

8.1 Компенсационный метод измерения

Этот метод применяют в основном с эталонными, образцовыми и лабораторными терморезисторами высокой точности и малым номинальным сопротивлением (R_0 порядка 10 Ом). Сущность этого метода состоит в сравнении результатов измерения падения напряжения на терморезисторе R_1 и образцовом резисторе R_2 (рисунок 8.1.1).

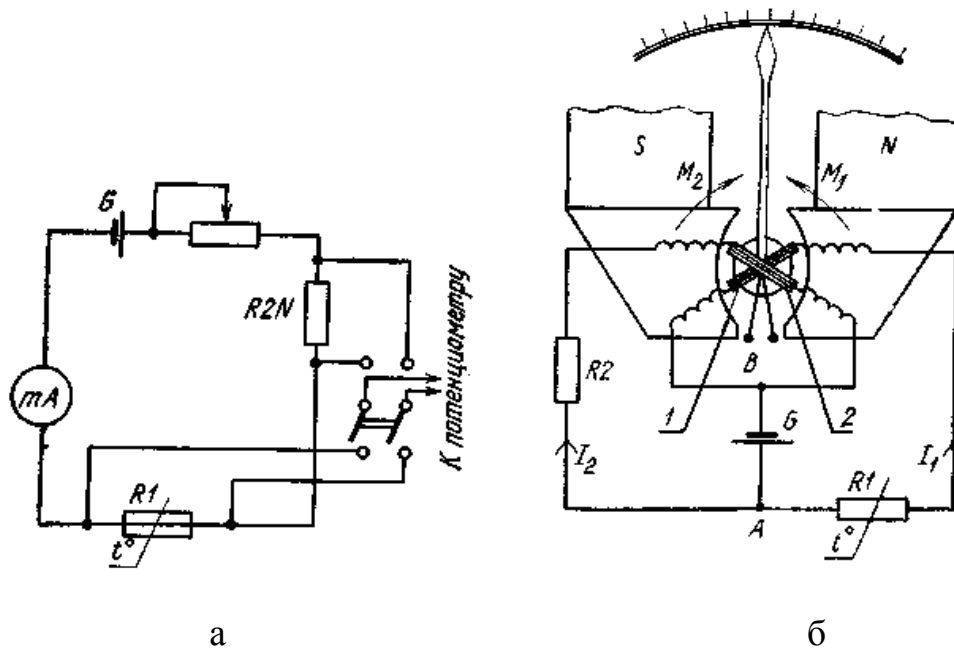


Рисунок 8.1.1 – Измерение термосопротивления с помощью потенциометра (а) и логометра (б)

Оба эти резистора включены в цепь постоянного тока со стабилизированным источником питания G . Ток в цепи контролируется миллиамперметром. Так как соединение R_1 и R_{2N} последовательное, то ток в цепи

$$I = \frac{U_1}{R_{R1}} = \frac{U_2}{R_{R2N}}; \quad (8.1.1)$$

откуда
$$R_{R1} = \frac{U_1}{U_2} R_{R2N}; \quad (8.1.2)$$

где U_1 и U_2 — падения напряжения на терморезисторе и образцовом резисторе.

Сопротивление образцового резистора известно (для резистора 1-го класса — с точностью до 0,001%), поэтому, применяя точные потенциометры, можно измерить R_{R1} с очень маленькой погрешностью.

Логометры являются очень распространенными приборами для измерения сопротивления терморезисторов. Чаще всего применяются магнитоэлектрические логометры двух типов: с подвижными рамками и с подвижным магнитом.

Как известно, логометрами называют приборы, имеющие две или более жестко связанные между собой рамки (катушки) с протекающим по ним током, которые, взаимодействуя с магнитным полем постоянного магнита, создают два противоположно направленных вращающих момента. Сумма вращающих моментов определенной зависимостью связана с измеряемой величиной. Подвижная часть логометра не требует возвратной пружины, за исключением

слабой пружины (или постоянного магнита), для приведения подвижной части в исходное положение при отсутствии в цепи тока.

У логометра с двумя подвижными рамками 1 и 2 , цилиндрическим сердечником и цилиндрическими полюсными наконечниками с отрицательным эксцентриситетом (рисунок 8.1.1.б) подвижная система расположена таким образом, что зазор между сердечником и полюсными наконечниками переменный и увеличивается от середины наконечников к краям. Из-за этого магнитная индукция в зазоре плавно уменьшается от середины наконечников к краям.

Вращающие моменты M_1 и M_2 , возникающие при взаимодействии магнитных полей токов I_1 и I_2 , которые протекают по рамкам 1 и 2 , и магнитного поля постоянного магнита, направлены встречно и могут быть в общем виде представлены выражениями:

$$M_1 = \kappa_1 I_1 B_1; \quad M_2 = \kappa_2 I_2 B_2; \quad (8.1.3)$$

где κ_1 и κ_2 — коэффициенты, характеризующие конструктивные особенности рамки, — число витков, размеры и т. д.

Если рамки по своим параметрам одинаковы, то $\kappa_1 = \kappa_2$, и при равенстве токов жестко скрепленные между собой рамки стремятся занять положение, симметричное относительно магнитного потока в зазоре. При этом положении $M_1 = M_2$ и, следовательно, $I_1 B_1 = I_2 B_2$.

Если в результате изменения температуры терморезистора R_1 , включенного последовательно в цепь одной из рамок, изменяется ток в этой рамке, то условие $M_1 = M_2$ нарушается, и система начинает вращаться в сторону действия большего момента. При этом рамка с меньшим током перемещается в направлении увеличения магнитной индукции B в зазоре, а рамка с большим током — в направлении уменьшения магнитной индукции. Вращение продолжается до тех пор, пока не сравняются моменты: $M_1' = M_2'$; $I_1' B_1' = I_2' B_2'$.

Так как зазор между наконечниками и сердечником имеет вполне определенную конфигурацию, то отношение I_1/I_2 , равное B_2/B_1 связано устойчивой зависимостью с угловым положением рамок:

$$B_2/B_1 = f(\alpha), \text{ откуда } \alpha = f_1(I_1/I_2); \quad (8.1.4)$$

Важным свойством логометров является независимость их показаний от напряжения питания измерительной цепи.

Наряду с логометрами с подвижными рамками очень широко распространены логометры с подвижным цилиндрическим или эллиптическим магнитом. У этих логометров (рисунок 8.1.2, а) подвижная система и стрелка соединены с постоянным магнитом, расположенным в магнитном поле двух (или более) скрещенных неподвижных катушек 1 и 2 .

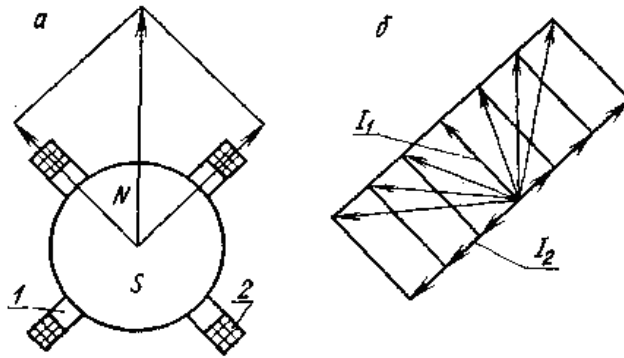


Рисунок 8.1.2 – Схема логометра с подвижным магнитом

Угол поворота подвижной системы зависит от значения и направления тока в катушках (рамках). Если в одной из катушек ток (I_1 на рисунок 8.1.2, б) остается постоянным, а во второй катушке (I_2) меняется, то угол поворота подвижной системы меньше 180° . При изменении тока в обеих рамках этот угол может быть больше 180° , а в многообмоточных приборах почти 360° .

Измерительная цепь термометров сопротивления с логометрами обычно выполняется по схеме неравновесного моста (рисунок 8.1.3). Работы логометра L_1 и L_2 включены в измерительную диагональ моста, причем в схему введена полудиагональ R_4 , состоящая двух резисторов $R_{4.1}$ и $R_{4.2}$. Такое решение повышает чувствительность схемы, так как при разбалансе моста токи в катушках L_1 и L_2 протекают встречно. Сопротивление R_4 выбирают из условий температурной компенсации, для чего $R_{4.1}$ выполняют с нулевым ТКС (из манганина), а $R_{4.2}$ — с положительным ТКС (например, из меди).

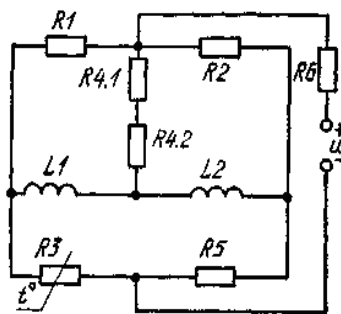


Рисунок 8.1.3 – Измерительная цепь термометров сопротивления с логометрами

Автоматические электронные мосты применяются в комплекте с терморезисторами стандартных градуировок для измерения температуры от -200 до $+650$ °С в стационарных условиях.

На рисунке 8.1.4 приведена принципиальная схема показывающего автоматического моста переменного тока. Измерительная схема состоит из резисторов следующего назначения: R1— реохорд; R2— шунт реохорда; R6— резистор задания предела измерения; R3— резистор задания начала шкалы; R7, R9, R10— резисторы мостовой схемы; R8— балластный резистор для ограничения тока; R4, R5— подгоночные резисторы; R15— резисторы подгонки сопротивления линии; R16 — терморезистор- (датчик) одной из стандартных градуировок; M— реверсивный двигатель; А— электронный (ламповый или транзисторный) усилитель.

Реохорд представляет собой калиброванный проволочный резистор с линейным законом изменения сопротивления, выполненный из проволоки ПдВ-20 (палладий — вольфрам), намотанной с постоянным шагом на основании из проволоки ПЭВ-2. Остальные сопротивления схемы выполнены в виде катушек из стабилизированной марганцевой проволоки.

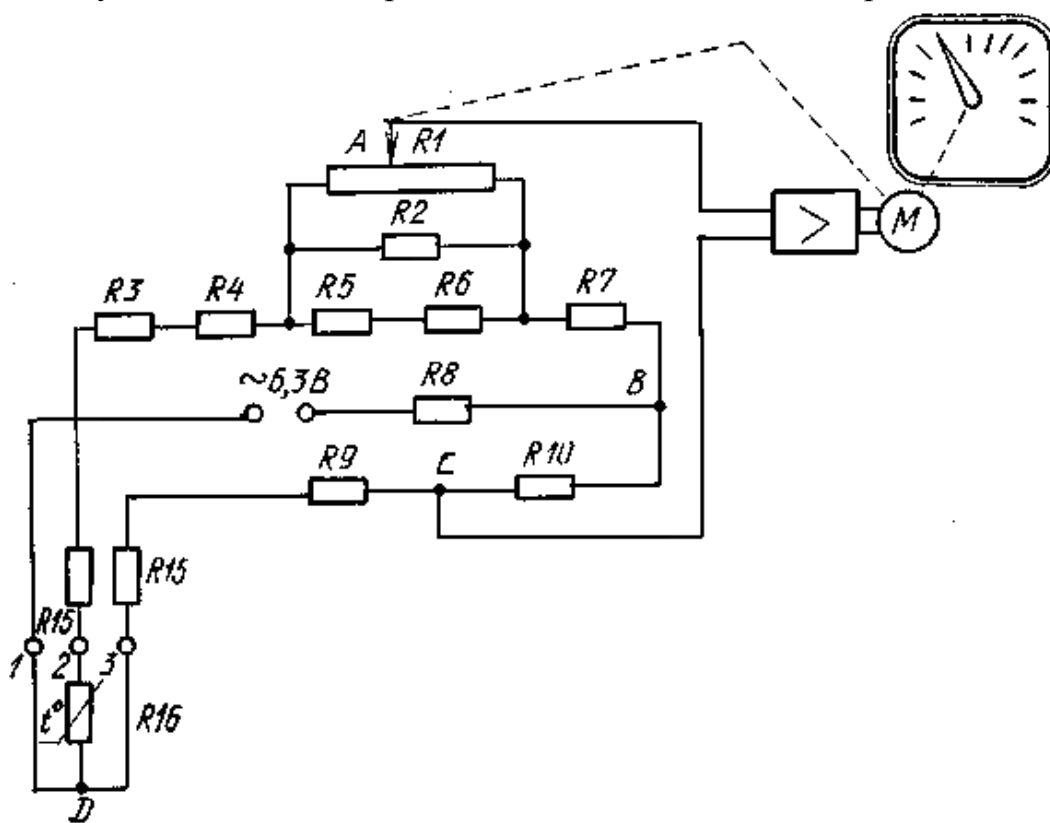


Рисунок 8.1.4 – Автоматически мост переменного тока

Измерительная схема — уравновешенный мост с плечами АВ, ВС, СД и DA. В плечо DA включен датчик — терморезистор R16. В целях уменьшения температурной погрешности от изменения температуры медных проводов, соединяющих терморезистор с прибором, его включают по трехпроводной схеме. Благодаря этому провода, идущие от зажимов 2 к 3 к терморезистору, включаются в соседние плечи моста и изменения их сопротивления из-за нестабильности температуры в помещении компенсируют друг друга и не вносят дополнительной погрешности.

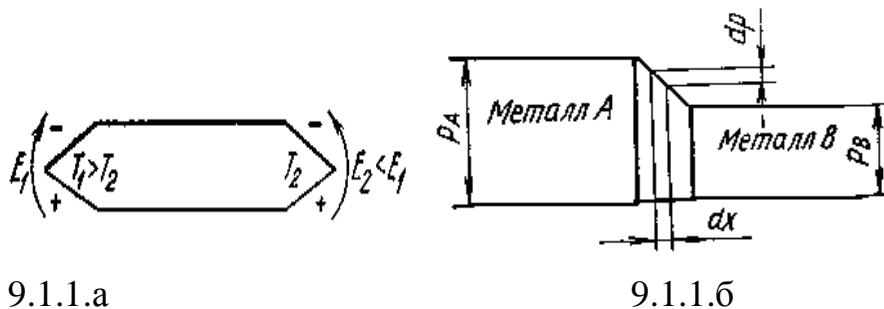
При изменении измеряемой температуры меняется сопротивление терморезистора R16 и нарушается равновесие моста. В диагонали AC появляется напряжение разбаланса, и через усилитель течет ток. Этот ток после усиления подается на управляющую обмотку реверсивного двигателя, который начинает вращаться и перемещает движок реохорда до восстановления равновесия моста. Одновременно перемещается стрелка указателя.

Прибор может работать с терморезистором ТСП или ТСМ любой стандартной градуировки. Эта универсальность легко обеспечивается: требуется только сменить резисторы R3, R6 и шкалу. Приборы выпускаются классов 0,25 и 0,5, показывающие и самопишущие, одно- и многоточечные (до 12 точек). Приборы могут быть снабжены дополнительными сигнальными и регулирующими устройствами, а также устройствами для дистанционной передачи.

9. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПАР

9.1 Принцип действия термопар

Работа термоэлектрических термометров основана на явлении термоэлектричества. Сущность явления заключается в том, что в замкнутой цепи, составленной из двух различных проводников (или полупроводников) появляется эдс, если температура одного места соединения отличается от температуры другого (рисунок 9.1.1.а).



9.1.1.а

9.1.1.б

Рисунок 9.1.1 – Схема термопары (а); определение контактной разности потенциалов (б)

Такая эдс называется термоэлектродвижущей силой (тэдс); цепь называ-

ется термоэлектрическим преобразователем или термопарой, проводники, составляющие термопару, — термоэлектродами, а места их соединения — спаями.

Электронная и квантовая теории металлов объясняют явление возникновения тэдс тем, что электроны проводимости (свободные электроны), движущиеся в потенциальном поле, создаваемом ионами металла и остальными электронами, образуют «электронный газ», подобный идеальному газу, причем плотность этого газа в разных металлах различна.

Если соединить два разнородных проводника А к В (рисунок 9.1.1.б) и обозначить плотность электронного газа в проводнике А через N_A , в проводнике В — N_B , то в соответствии с кинетической теорией газа давление электронного газа при температуре Т:

$$p_A = \kappa N_A T ; \quad (9.1.1)$$

$$p_B = \kappa N_B T ; \quad (9.1.2)$$

где $\kappa=1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; Т — термодинамическая температура, К.

При соединении проводников электроны перетекают из металла с большим давлением электронного газа в металл с меньшим давлением (например, из металла А в металл В), и, следовательно, в месте соприкосновения металлов давление постоянно изменяется от p_A до p_B . На бесконечно малом расстоянии dx в месте спая приращение давления можно определить как:

$$dp = \kappa T dN ; \quad (9.1.3)$$

В то же время это приращение давления равно работе электрических сил на том же пути:

$$dp = eNdU ; \quad (9.1.4)$$

где $e=1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; dU — приращение потенциала.

Решая совместно эти уравнения, получаем:

$$dU = \frac{\kappa T dN}{eN} ; \quad (9.1.5)$$

или после интегрирования

$$U_A - U_B = \frac{\kappa T}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} ; \quad (9.1.6)$$

т. е. в месте соединения возникает контактная разность потенциалов $U_A - U_B$.

Если замкнуть и другие концы проводников, то во втором спаяе, если он находится при той же температуре Т, образуется такая же контактная разность потенциалов, но действующая в замкнутой цепи в противоположном направлении, так что суммарная тэдс в цепи равна нулю. Однако если темпе-

ратуры спаев отличаются друг от друга, то контактные разности потенциалов уже не будут одинаковыми. Если температуры спаев T_1 и T_2 , а плотности электронного газа в местах спаев $N_{A(T_1)}$, $N_{B(T_1)}$, $N_{A(T_2)}$ и $N_{B(T_2)}$, то разность потенциалов в спае с температурой T_1 :

$$U_{AB(T_1)} = \frac{\kappa T_1}{e} \ln \frac{N_{A(T_1)}}{N_{B(T_1)}} ; \quad (9.1.7)$$

и в спае с температурой T_2 :

$$U_{AB(T_2)} = \frac{\kappa T_2}{e} \ln \frac{N_{A(T_2)}}{N_{B(T_2)}} ; \quad (9.1.8)$$

Тогда разность потенциалов между спаями (термоэдс)

$$E_{AB(T_1, T_2)} = U_{AB(T_1)} - U_{AB(T_2)} = \frac{e}{k} (T_1 \ln \frac{N_{A(T_1)}}{N_{B(T_1)}} - T_2 \ln \frac{N_{A(T_2)}}{N_{B(T_2)}}) ; \quad (9.1.9)$$

Так как плотность электронного газа в проводнике также зависит от температуры, то можно записать, что:

$$E_{AB(T_1, T_2)} = f_1(T_1) - f_2(T_2) ; \quad (9.1.10)$$

Можно один из спаев (называемый рабочим, или горячим) поместить в среду, температуру которой нам нужно измерить, а температуру другого спая или других, если их несколько, поддерживать постоянной и отличной температуры горячего спая.

Зависимость термоэдс от температуры в общем случае является нелинейной, однако в практике технических измерений при небольшой разности измеряемых температур с незначительной погрешностью ее можно считать линейной вида: $E = SQ$ где $Q = T_1 - T_2$ — разность температур спаев; S — коэффициент, зависящий главным образом от химического состава электродов и не зависящий от их геометрических размеров, формы и способа их соединения. Вообще, термоэдс возникает в цепи не только под влиянием контактной разности потенциалов в спаях, но также и из-за наличия градиента температуры вдоль термоэлектродов (эффект Томсона), однако последняя составляющая незначительна (на несколько порядков меньше первой).

Применение термопар основывается на использовании различных их свойств.

1. Свойство промежуточного металла: при включении третьего проводника из любого проводящего материала в разрыв одного из термоэлектродов или в один из спаев (рисунок 9.2) общая термоэдс не изменяется при условии, что температура мест включения обоих концов третьего проводника одинакова.

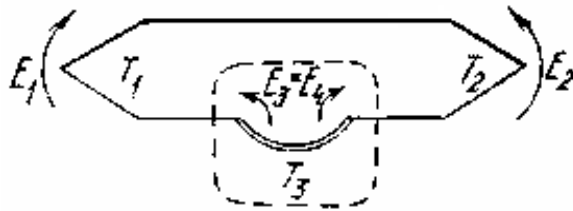


Рисунок 9.1.2 – Схема включения промежуточного металла

Это объясняется тем, что при включении третьего проводника в разрыв одного из термоэлектродов образуется два новых спаев, которые, имея одинаковую температуру, вносят в цепь две одинаковые по абсолютному значению, но противоположно направленные разности потенциалов, компенсирующие друг друга. При включении третьего проводника в разрыв одного из спаев вместо одной контактной разности потенциалов возникает две, алгебраическая сумма которых равна контактной разности потенциалов первоначального спаивания.

Свойство промежуточного металла позволяет включать приборы для измерения тэдс без внесения какой-либо погрешности. На основании этого свойства соединение термоэлектродов в горячем спае можно производить любым способом, обеспечивающим хороший электрический контакт (сваркой, спайкой, скруткой и т. п.). Появление новых сплавов или припоя в спае не дает дополнительной погрешности.

2. Свойство промежуточной температуры: если термопара развивает термоэдс E_1 при температуре ее спаев T_1 и T_2 и термоэдс E_2 при температуре спаев T_2 и T_3 то она разовьет термоэдс $E_3 = E_1 + E_2$ при температурах спаев T_1 и T_3 . Благодаря этому появляется возможность использовать свойства термопар, определенные при каких-то фиксированных температурах (например, 0° и 100°C), при другой температуре ее спаев и вводить поправки на действительную температуру холодного спаивания и т. п.

9.2 Термоэлектродные материалы и термопары

Термоэлектрические свойства материалов принято характеризовать значением тэдс, развиваемой этими материалами в паре с чистой платиной при температуре рабочего спаивания 100°C и свободных концов 0°C (таблица 9.2.1).

Примечание. Знак плюс в графе тэдс показывает, что электрод в паре с платиной является положительным электродом.

Тэдс пары определяется как алгебраическая разность тэдс ее электродов при работе с платиной. При конструировании термопар стремятся сочетать друг с другом термоэлектроды, дающие наибольшую тэдс, однако приходится учитывать также пригодность того или иного электрода для применения в данных условиях измерения (влияние на термоэлектрод среды, температуры,

стабильности свойств и т. п.).

Таблица 9.2.1

Материал	Содержание элементов, %	Тэдс, мВ
Кремний	Si	44,8
Хромель	Cr – 9,5; примеси 1,4; остальное (Ni+Co)	+2,90
Железо	Fe	+1,88
Манганин	Mn – 12,5; (Ni+Co) – 2,5; остальное - Cu	+0,76
Медь	Cu	+0,76
Платинородий	Pt – 90; Rh – 10	+0,64
Платина	Pt	0,00
Алюмель	(Ni+Co) – 94; Al – 2; Mn – 2,0; Si – 1,5; примеси – 0,5	-1,26
Константан	(Ni+Co) – 40; Mn – 1,5; остальное - Cu	-3,45
Копель	Cu – 56; (Ni+Co) – 44	-4,10

Хотя многие неметаллические материалы и полупроводники способны создать, тэдс во много раз большую, чем металл, они пока не получили широкого применения в практике измерения температуры из-за нестабильности их характеристик. Наиболее применяемые термопары охарактеризованы в таблице 9.2.2.

Таблица 9.2.2

Термопара	Градуировка	Состав электродов		Диапазон измерений, °С		Средняя чувствительность мВ/°С	Тэдс верхнего предела, мВ
		положительного	отрицательного	длительно	кратковременно		
Платинородий-платиновая ТПП	ПП	Платинородий (90% Pt, 10% Rh)	Платина	от 0 до +1300	+1600	0,01	16,714
Платинородий-платинородиевая ТПР	ПР-30/6	Платинородий (90% Pt, 10% Rh)	Платинородий (94% Pt, 6% Rh)	от +300 до +1600	+1800	0,01	13,812
Хромель-алюмелевая ТХА	ХА	Хромель	Алюмель	от -200 до +1000	+1300	0,04	52,43
Хромель-копелевая ТХК	ХК	Хромель	Копель	от -200 до +600	+800	0,08	66,47
Термопара с термоэлектродами из специальных сплавов ТНС	НС	Спецсплав НК	Спецсплав СА	от +200 до 1000	—	0,02	13,39
Медь-константановая	—	Медь	Константан	от -200 до +400	—	0,015—0,04	20
Вольфрам-рениевая ТВР	ВР-5/20	Сплавы вольфрама с рением (95% W, 5% Re) (80% W, 20% Re)		от 0 до +2200	+2500	0,01—0,015	33,670
Вольфрам-молибденовая ТВМ	ВМ	Вольфрам	Молибден	+1800	—	0,015—0,04	20

Примечание. Вольфрам-молибденовая термопара при температуре 1200°С меняет полярность. До указанной температуры положительным электродом является молибден, свыше 1200°С — вольфрам.

Тэдс термопар ТНС при температуре 0—200°С близка к нулю, поэтому, как правило, не требуется введения поправки на температуру холодного спая.

Технические термопары обычно помещены в металлические защитные чехлы, вследствие чего головка термопары, в которой к термоэлектродам подключают соединительные провода, находится в зоне сравнительно высокой и непостоянной температуры.

Использование медных проводов для соединения термопары с прибором, показывающим значение тэдс, приводит к значительным погрешностям за счет неопределенности температуры места соединения свободных концов термопары с медными проводами и возникновения вследствие этого паразитных термоэдс. Уменьшение этой погрешности возможно благодаря применению специальных удлинительных («компенсационных») проводов, которые подбираются таким образом, чтобы тэдс между ними была бы равна или близка тэдс термопары в области возможных температур в месте соединения удлинительных проводов с термоэлектродами (обычно в интервале 0...100°С). Благодаря этому свободные концы термопары как бы переносятся в зону с более низкой и стабильной температурой, в частности к зажимам прибора.

В таблице 9.2.3 приведены характеристики некоторых удлинительных проводов.

Таблица 9.2.3

Термопара	Материал удлинительных проводов и цвет их оплетки				Тэдс, мВ
	Положительный	Цвет	Отрицательный	Цвет	
ТПП ТВМ	Медь	Красный	Сплав ТП (99,4% Cu и 0,6% (Ni+Co))	Зеленый	0,64
ТХА	Медь Хромель	Красный Фиолето- вый	Константан Алюмель	Коричне- вый Черный	4,10 4,10
ТХК	Хромель	Фиолето- вый	Копель	Желтый	6,90

Примечания: 1. Тэдс приведена при температуре свободных концов 0°C и рабочих концов 100°C.

2. Для термопары ТВМ полярность удлинительных проводов обратная, т. е. положительный — из сплава ТП, отрицательный — из меди.

9.3 Приборы для измерения ТЭДС

Для измерения тэдс в практике промышленного использования термопар применяются пирометрические милливольтметры и автоматические потенциометры (компенсаторы). Эти приборы градуируются в градусах Цельсия в соответствии с одной из стандартных градуировок термопар.

Пирометрические милливольтметры, являющиеся приборами магнитоэлектрического типа, могут быть показывающими и самопишущими. Показывающие приборы являются одноточечными (могут работать только с одной термопарой), самопишущие выпускаются одно- и многоточечными (до десяти термопар). По точности пирометрические милливольтметры подразделяются на приборы классов 0,2; 0,5; 1,0 (переносные) и 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 (щитовые). Большинство технических приборов выпускается классов 1,0 и 1,5. Приборы могут быть снабжены встроенным электроконтактным устройством для сигнализации или регулирования температуры.

Существенными источниками погрешности измерения, не входящими в основную погрешность милливольтметра, являются:

1. Изменение термоэлектрических свойств термопары в процессе эксплуатации.

2. Отклонение температуры свободных концов термопары от градуировочного значения.

Перечисленные факторы совместно с температурной погрешностью милливольтметра могут привести к относительной погрешности измерения температуры 2—3%.

3. Отклонение сопротивлений внешней цепи милливольтметра от градуировочных значений, вызванное неточностью подгонки сопротивлений, температурными изменениями сопротивлений и т. п.

Более совершенными приборами для работы в комплекте с термопарами являются электронные автоматические потенциометры (компенсаторы). Уступая пирометрическим милливольтметрам в простоте устройства и стоимости, электронные потенциометры значительно превосходят их по ряду важнейших технических характеристик: более широким возможностям контроля и регулирования температуры, по быстродействию, по точности измерения и записи температуры и т. д.

Работа потенциометров основана на том, что искомое напряжение определяется путем его компенсации падением напряжения на резисторе, включенном в цепь стабилизированного источника питания. Сопротивление резистора известно. Таким образом, падение напряжения на нем (при известном токе) может быть вычислено с большой точностью.

Принципиальная схема, поясняющая работу потенциометра, приведена на рисунке 9.3.1. В цепь источника питания включен линейный потенциометр (реохорд). Полярность включения источника питания и термопары такова, что через гальванометр токи от тэдс и от напряжения на участке АВ реохорда протекают встречно. Перемещением движка потенциометра находят его положения, когда напряжение на участке АВ реохорда равно напряжению тэдс, развиваемой термопарой. При этом токи полностью компенсируются, и гальванометр в цепи термопары показывает отсутствие тока.

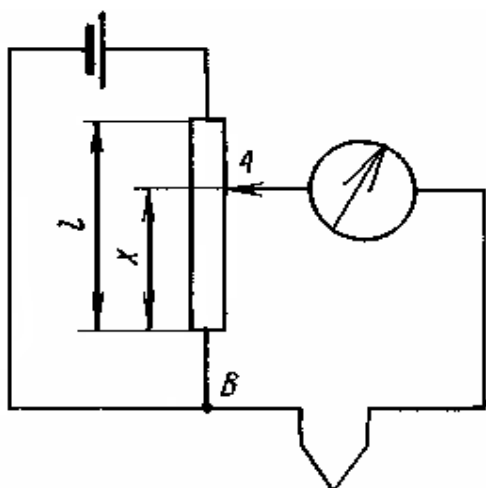


Рисунок 9.3.1 – Схема потенциометра

Так как напряжение источника питания $U=IR_i$, то падение напряжения на участке АВ:

$$U_{AB} = IR_x = E ; \quad (9.3.1)$$

где E —термоэдс; отсюда $E = U_{AB} = \frac{R_x}{R_i} U$, а так как реохорд имеет линейную характеристику, то:

$$E = \frac{x}{l} U ; \quad (9.3.2)$$

10 ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ

10.1 Основные понятия и классификация приборов для измерения давления

Под давлением жидкости, газа или пара понимают величину, характеризующую интенсивность сил, действующую на какую-нибудь часть поверхности тела по направлениям, перпендикулярным этой поверхности. Давление определяется отношением силы, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности, к площади этой поверхности. Единицей давления в СИ является паскаль (Па).

Паскаль — давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м² и нормальной к ней. Различают атмосферное, избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давление. Атмосферное (барометрическое) давление $p_б$ — это давление окружающей среды. Оно непостоянно и зависит от высоты местности над уровнем моря, географической широты и метеорологических условий. Абсолютное давление p_a — измеряемое давление среды. Оно может быть больше или меньше атмосферного. Избыточное давление $p_{изб}$ определяется как превышение измеряемого давления среды над атмосферным, т. е. $p_{изб} = p_a - p_б$. Вакуумметрическое давление $p_в$ характеризует разрежение (вакуум) в среде, т. е. $p_в = p_б - p_a$. Вакуумметрические давления можно выразить относительной величиной в процентах:

$$V = \frac{p_в}{p_б} \cdot 100\% ; \quad (10.1.1)$$

Приборы для измерения давления классифицируются по принципу действия, по уровню измеряемого давления, классу точности. По принципу действия приборы делятся на:

1) жидкостные, у которых измеряемое давление сравнивается с гидростатическим давлением столба жидкости;

2) грузопоршневые, которые основаны на сравнении измеряемого давления с давлением, создаваемым аттестованными грузами, действующими на калиброванный плунжер;

3) деформационные (пружинные), у которых измерение давления производится по деформации различных упругих элементов, возникающей под действием регистрируемого давления;

4) электрические, основанные на прямом или косвенном преобразовании давления в какую-либо электрическую величину. Приборы данного типа широко применяются в лабораториях для исследовательских целей;

5) прочие, к которым можно отнести тепловые, акустические, оптические и др.

По уровню измеряемого давления приборы делятся на:

1) манометры, предназначенные для измерения избыточного давления. Верхний предел измерения этих приборов до 1000 МПа;

2) вакуумметры – приборы для измерения разрежений (вакуумметрических давлений); диапазон измерений от 0 до $-0,1$ МПа;

3) напоромеры и тягомеры — приборы для измерения малых давлений и разрежений от $+0,04$ до $-0,04$ МПа;

4) мановакуумметры — приборы для измерения избыточного давления ($0,06—2,4$ МПа) и разрежения (до $-0,1$ МПа);

5) манометры абсолютного давления;

б) барометры — приборы, предназначенные для измерения атмосферного давления;

7) дифференциальные манометры — приборы, обеспечивающие измерение разности двух давлений;

8) микроманометры — лабораторные приборы повышенной точности для малых избыточных давлений.

По метрологическому назначению все, существующие типы манометров можно разделить на три группы: 1) технические (рабочие); 2) лабораторные (контрольные); 3) образцовые (предназначенные для поверки других манометров).

Установлен следующий ряд классов манометров: 0,005; 0,02; 0,05; 0,15; (6,16); (0,2); (0,25); 0,4; (0,5); 0,6; 1,0; 1,5; (1,6); 2,5; 4,0; 6. В скобках указаны классы приборов, использующихся реже других.

Под классом точности прибора понимают предельное значение допустимых основных и дополнительных погрешностей его, выраженное в процентах от диапазона измерений данного прибора. Так, манометр класса 2,5 с предельными значениями шкалы 0 и 1 МПа может иметь относительную погрешность до 2,5 % от 1 МПа. Выбор класса прибора зависит от тре-

буемой точности измерений и возможности осуществления всех условий (технических, экономических и организационных), необходимых для достижения этой точности. Одновременно с делением по классам точности образцовые приборы в зависимости от положения в поверочной схеме классифицируются по разрядам.

10.2 Жидкостные манометры

В жидкостных манометрах, или дифманометрах, измеряемое давление или разность давлений уравнивается давлением столба жидкости. Измерение давления с помощью жидкостных манометров основано на изменении высоты столба (уровня) рабочей жидкости в стеклянной измерительной трубке в зависимости от прилагаемого давления. В качестве манометрической (рабочей) жидкости чаще всего используются: этиловый спирт, дистиллированная вода, ртуть. Использование этих веществ связано со стабильностью их физических свойств, незначительной вязкостью, несмачиваемостью стенок.

Процесс измерения давления можно осуществить с высокой степенью точности. Простота устройства и легкость измерения являются причиной широкого распространения жидкостных манометров.

К приборам этого типа относятся двухтрубные (*U-образные*, рисунок 10.2.1 *а*) и однотрубные чашечные (рисунок 10.2.1 *б*) манометры, а также микроманометры.

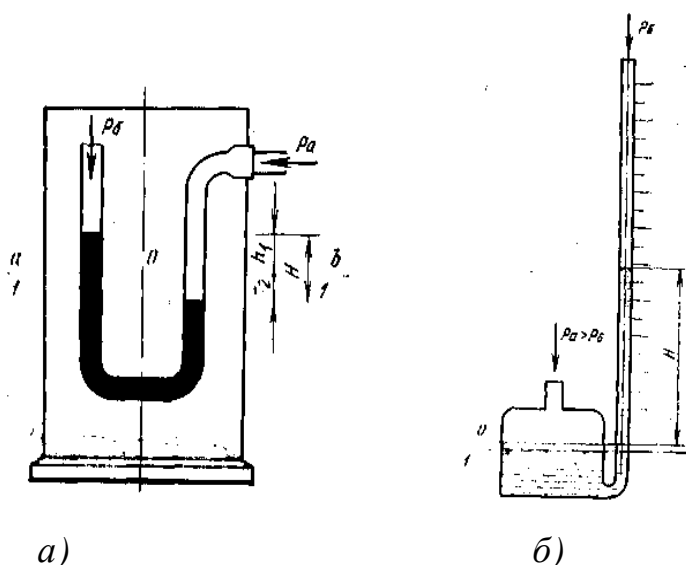


Рисунок 10.2.1 - Схема U-образного (*а*) и однотрубного чашечного манометра (*б*)

Двухтрубный манометр предназначен для измерения избыточных давлений или разности давлений. Шкала прибора обычно выполняется

подвижной. Перед началом измерений производят проверку нуля, соединив с атмосферой оба колена U-образного манометра. При этом уровни рабочей жидкости устанавливаются на одной горизонтали *ab*. Перемещая шкалу прибора, совмещают нулевую отметку шкалы с установившимся уровнем жидкости. При соединении одного колена трубки с емкостью, в которой необходимо измерить давление, жидкость перемещается до тех пор, пока измеряемое давление не уравновесится давлением столба жидкости высотой *H*. Так как уровень жидкости в одной трубке повышается, а в другой понижается, то высота столба *H* определяется как разность двух отсчетов. Этот недостаток U-образных манометров частично устранен в чашечном манометре, состоящем из сосудов разного диаметра. Измеряемое давление подается в плюсовой (широкий) сосуд, а разность уровней определяется путем снятия одного отсчета по минусовой тонкой трубке.

Для сечения *a-b* (рисунок 10.2.1 *a*) справедливо следующее равенство сил:

$$p_a f = p_b f + H \cdot \rho \cdot g \cdot f ; \quad (10.2.1)$$

где p_a и p_b — абсолютное и атмосферное давление, Па; f — площадь отверстия измерительной трубки, м²; H — высота подъема столба жидкости, м; ρ — плотность рабочей жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

Путем преобразования выражения получим:

$$p_{изб} = p_a - p_b = H \cdot \rho \cdot g ; \quad (10.2.2)$$

Очевидно, что при измерении избыточного давления высота подъема рабочей жидкости не зависит от площади поперечного сечения трубок. Исходя из условий удобства работы с прибором (для ограничения высоты трубок манометра), при измерении избыточного давления 0,15–0,2 МПа рекомендуется в качестве рабочей жидкости использовать ртуть, при более низких давлениях воду или спирт.

Чашечный и U-образный манометры не могут использоваться при измерении малых избыточных давлений и разрежений, так как погрешность измерений становится чрезмерно большой. В этих случаях применяются специальные чашечные манометры с наклонной трубкой (микроманометры)

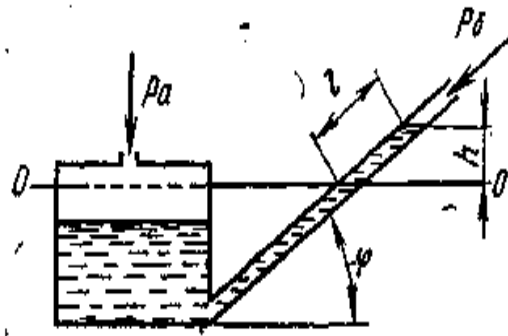


Рисунок 10.2.2 – Схема микроманометра с наклонной трубкой

Использование наклонной трубки (рисунок 10.2.2) позволяет, уменьшив угол φ , при той же высоте подъема столба жидкости h увеличить его длину, что превышает точность отсчета. Измерение длины и высоты столба жидкости связано соотношением $h = l \sin \varphi$. Отсюда $p = l \cdot g \cdot \sin \varphi$. Изменяя угол наклона трубки φ , можно изменять пределы измерений прибора. Минимальный угол наклона трубки $8\text{—}10^\circ$. Погрешность прибора не превышает $\pm 0,5\%$ конечного значения шкалы.

10.3 Деформационные (пружинные) манометры

Этот тип прибором походит наиболее широкое применение благодаря простоте конструктивных решений, достаточно высокой точности и надежности, а также небольшим габаритам. Деформационные манометры позволяют проводить измерения в широком диапазоне и передавать и осуществлять дистанционную регистрацию результатов.

Работа приборов основана на измерении деформации упругого чувствительного элемента, возникающей в результате воздействия измеряемого давления. Деформация фиксируется отсчетным устройством прибора, градуированным в единицах давления.

Деформационные манометры по виду упругого чувствительного элемента принято классифицировать на следующие группы прибором: с трубчатой пружиной, или, собственно, пружинные приборы; мембранные; пружинно-мембранные; сильфонные; пружинно-сильфонные приборы.

Манометры с одновитковой трубчатой пружиной (рисунок 10.3.1) имеют металлическую трубку эллиптического или плоскоовального сечения, согнутую по дуге окружности. Один конец трубки через штуцер жестко соединен с полостью, в которой измеряется давление. Вторым запаянным концом трубки свободен и соединен со стрелкой прибора. При изменении давления внутри

трубки изменяется ее Кривизна, что фиксируется стрелкой показывающего прибора. Аналогичную конструкцию имеют вакуумметры и мановакуумметры.

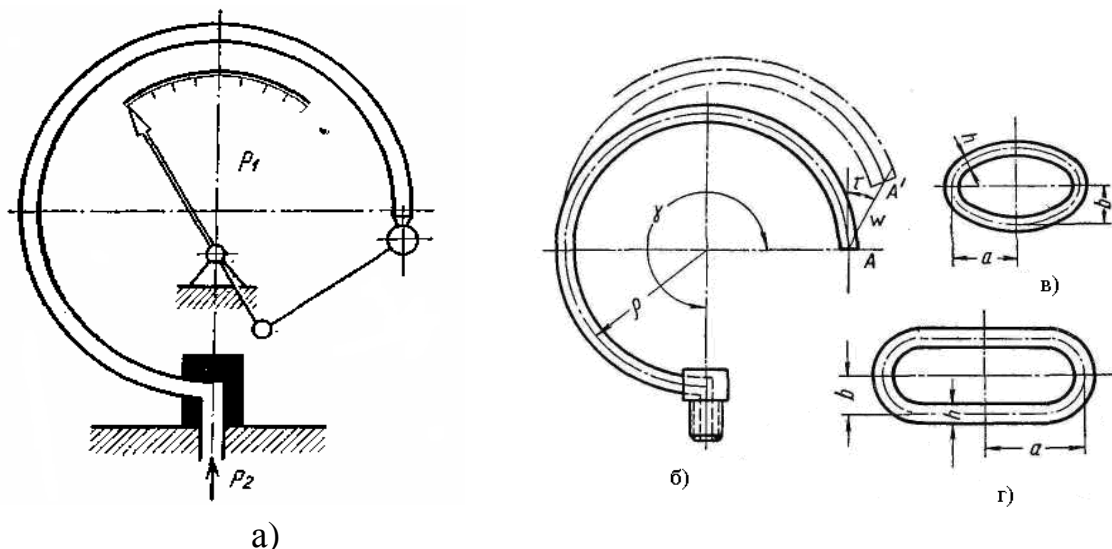


Рисунок 10.3.1 – Схема манометра с одновитковой трубчатой пружиной (а); схема трубчатой пружины (б); эллиптическое поперечное сечение (в); плоско-овальная поперечное сечение (г)

Перемещение свободного конца трубчатой пружины находится в прямой зависимости от давления. Пружина работает в зоне пропорционального изменения напряжения и деформации, вследствие чего градуировка шкалы манометра равномерная. Однако перемещение свободного конца одновитковой пружины невелико (до 5—8 мм). При превышении предела пропорциональности незначительное приращение давления p приводит к появлению остаточной деформации пружины и погрешности измерения. На точность измерений трубчато-пружинными манометрами оказывает влияние упругий гистерезис трубки, определяемый как разность положения' конца трубки при одном и том же давлении при постепенном повышении (прямой ход) и понижении (обратный ход) давления, а также упругое последствие, которое проявляется в том, что при достижении некоторого давления деформация трубки продолжается, несмотря на то, что давление больше не изменяется. Упругий гистерезис и упругое последствие вызывают специфические погрешности всех деформационных манометров.

Перемещение свободного конца тонкостенной трубчатой пружины эллиптического (овального) или плоско-овального поперечного сечения при создании избыточного давления p внутри трубки будет:

$$\omega = p \frac{1 - \mu^2}{E} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{\rho^3}{bh} \cdot \frac{\alpha}{\beta + \chi^2} \sqrt{(\gamma - \sin \gamma)^2 + (1 - \cos \gamma)^2} ; \quad (10.3.1)$$

В этой формуле:

μ - коэффициент Пуассона материала трубки (для латуни и стали $\mu=0,3$);

E – модуль упругости материала трубки;
 a и b – полуоси поперечного сечения трубки;
 ρ – радиус кривизны трубки;
 h – толщина стенки трубки;
 γ – центральный угол трубки;
 χ – главный параметр трубки

$$\left(\chi = \frac{\rho h}{a^2} \right); \quad (10.3.2)$$

α и β – безразмерные коэффициенты, величина которых зависит от формы поперечного сечения трубки и от отношения $\frac{a}{b}$.

У трубчато-пружинных приборов чувствительность растет с уменьшением толщины стенок трубки, увеличением радиуса и центрального угла кривизны пружины, а также с увеличением отношения осей поперечного сечения трубки.

Деформационные приборы изготавливаются для работы в качестве образцовых, контрольных и технических с классами точности от 0,2 до 4. Пределы измерения приборов от 0,1 до 1000 МПа, а по вакуумметрической части шкалы – до 0,1 МПа.

Манометры с многовитковой трубчатой пружиной представляют собой приборы, имеющие как бы последовательно соединенные 6 – 9 одновитковых пружин. При этом развивается значительное усилие, что позволяет использовать многовитковые пружины в самопишущих манометрах.

Приборы, использующие в качестве чувствительного элемента гофрированные мембраны (рисунок 10.3.2), мембранные коробки и блоки, применяются для измерения небольших избыточных давлений и разрежений (манометры, напоромеры и тягомеры), а также перепадов давления (дифманометры). Гофрировка мембраны значительно уменьшает нелинейность характеристики и увеличивает чувствительность. Связь между прогибом и давлением в общем случае нелинейная. Для увеличения прогиба мембраны в приборах измерения малых давлений используется соединение мембран попарно в мембранные коробки, а коробок – в блоки. Мембранные коробки в зависимости от конструкции могут быть анероидными и манометрическими.

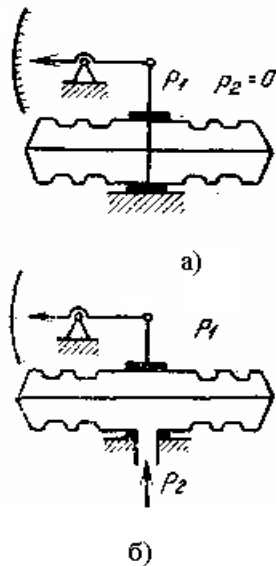


Рисунок 10.3.2 - Схема анероидной (а) и манометрической мембранной коробки (б)

Характеристику мембраны без жёсткого центра с гофрировкой периодического профиля можно рассчитать по формуле:

$$\rho = \frac{Eh^4}{R^4} \left[a \left(\frac{\omega}{h} \right) + b \left(\frac{\omega}{h} \right)^3 \right]; \quad (10.3.3)$$

где p — разность абсолютных давлений с двух сторон мембраны;

E — модуль упругости материала мембраны;

h — толщина мембраны;

R — радиус мембраны;

ω — прогиб мембраны в центре;

α и β — коэффициенты, зависящие от формы профиля гофрировки, относительной глубины гофрировки и от величины коэффициента Пуассона материала мембраны.

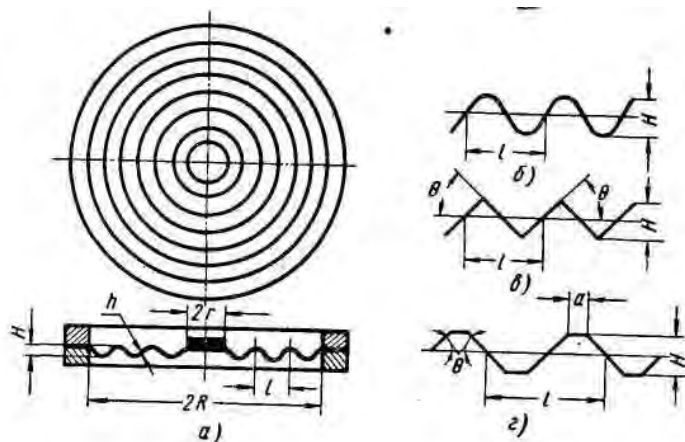


Рисунок 10.3.3 – Формы профиля гофрировки мембран (а); синусоидальная (б); пильчатая (в); трапециевидальная (г)

Манометры для измерения давления до 0,4 МПа, а также вакуумметры и мановакуумметры могут иметь в качестве чувствительного элемента гофрированный тонкостенный цилиндрический сосуд (рисунок 10.3.4). При изменении давления изменяется высота сиффона, и шток перемещается и приводит в движение стрелку отсчетного устройства и перо самописца.

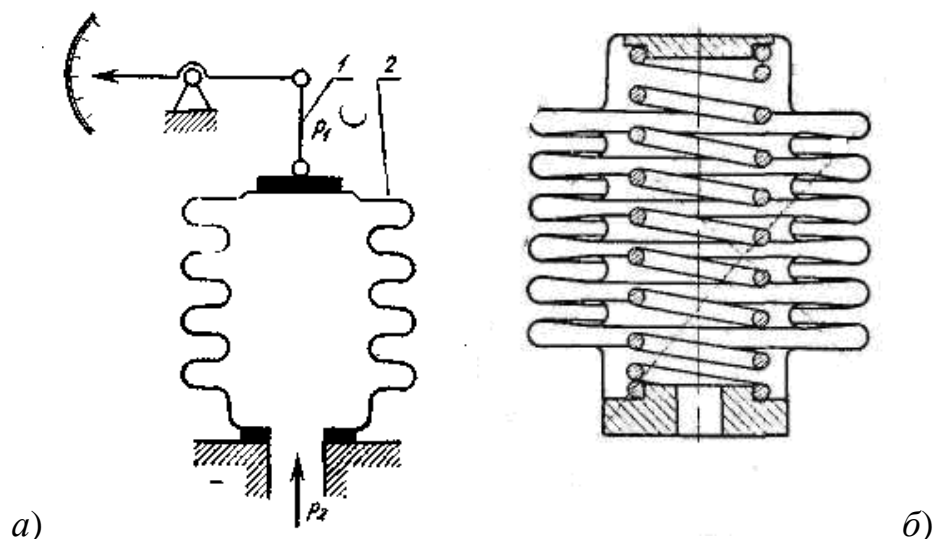


Рисунок 10.3.4 – Схема сиффонного манометра (а); разрез сиффона (б)

10.4 Грузопоршневые манометры

Показания поршневых манометров, как и любых других приборов, зависят от условий, в которых проводятся измерения. Поэтому, несмотря на то, что поршневые манометры являются наиболее стабильными по сравнению с манометрами других типов, в их показания при измерениях высокой точности необходимо вводить соответствующие поправки, учитывающие влияние условий измерений. К ним относятся влияние температуры окружающей среды, деформации поршня и цилиндра под действием измеряемого давления, а для поршневых манометров, в которых измеряемое давление определяется по весу уравнивающих его грузов, необходимо учитывать местное ускорение свободного падения и потерю массы грузов в воздухе.

Поправка на температуру. Основная постоянная поршневого манометра — эффективная площадь поршня F_{20} — определяется при нормальной температуре $t = 20^\circ\text{C}$. Если при измерениях температура t поршневого манометра F отличается от нормальной, то эффективная площадь:

$$F = F_{20} [1 + (\alpha + \beta)(t - 20^\circ\text{C})], \quad (10.4.1)$$

где α и β — коэффициенты линейного расширения материалов поршня и цилиндра.

Так как площадь поршня увеличивается при увеличении температуры, то при одном и том же давлении увеличится сила, необходимая для уравнивания давления, а, следовательно, температурная поправка должна вводиться со знаком „минус”.

Температурная поправка:

$$\Delta p_t = -p(\alpha + \beta)(t - 20^\circ\text{C}) ; \quad (10.4.2)$$

Следует отметить, что температурная поправка практически не зависит от формы поршневой пары или наличия в измерительной системе более одной поршневой пары, если температура различных частей измерительной системы манометра одинакова.

Если поршень и цилиндр изготовлены из стали ($\alpha = \beta$) = $12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, то температурная поправка:

$$\delta_t = \frac{\Delta p_t}{p} = -2,4 \cdot 10^{-5} (t - 20^\circ\text{C}) ; \quad (10.4.3)$$

т. е. 0,0024 % на 1°C , что в 9 раз меньше чем для жидкостных манометров.

Поправка на изменение эффективной площади поршня от давления. Относительное изменение эффективной площади поршня под действием измеряемого давления $\delta_{F_p} = \Delta F_p / F = \lambda \cdot p$, где λ — коэффициент изменения площади, значения которого зависят от формы конструкции и упругих свойств материала поршневой пары.

Отсюда поправка к измеряемому давлению:

$$\delta_p = -\lambda \cdot p ; \quad (10.4.4)$$

Так же, как и температурная поправка, поправка на изменение эффективной площади поршня от давления отрицательна. Для простой цилиндрической поршневой пары, в которой поршень и цилиндр изготовлены из одного и того же материала, коэффициент изменения площади:

$$\lambda = \frac{1}{E} \left(\frac{1}{\frac{R^2}{r^2} - 1} + 2\mu \right) ; \quad (10.4.5)$$

где r и R - радиусы поршня и цилиндра (наружные); E — модуль упругости материала, из которого изготовлены поршень и цилиндр; μ — коэффициент Пуассона.

Если наружный радиус цилиндра существенно больше радиуса поршня ($R^2 / r^2 \gg 1$), то коэффициент изменения площади $\lambda \approx \frac{2\mu}{E}$. Для стальных поршня и цилиндра $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu = 0,3$, а коэффициент изменения площади $\lambda = 2,67 \cdot 10^{-12}$ Па $^{-1}$. Отсюда $\delta_p = -\lambda p = -2,67 \cdot 10^{-12} \cdot p$. В зависимости от измеряемого давления поправка на деформацию, приведенной в таблице 10.4.1.

Таблица 10.4.1

p , МПа	1	10	100	1000
δ_p , %	-0,0003	-0,003	-0,027	-0,267

Таким образом, при измерениях с погрешностью более 0,01 % указанной поправкой можно пренебречь, если измеряемое давление не превышает 10 МПа.

Поправка на местное ускорение свободного падения. Если при измерениях давление уравнивается весом грузов, то согласно уравнению измерений грузопоршневых манометров $p = mg / F$, где m — масса грузов, необходимых для достижения равновесия; g — местное ускорение свободного падения. Поэтому при одних и тех же значениях массы грузов и эффективной площади поршня давление прямо пропорционально местному ускорению свободного падения. Вместе с тем, исходя из требований поверочной практики, поршневые манометры должны обеспечивать воспроизведение давлений, значения которых соответствуют номинальным („круглым“) значениям давления. Поэтому при выпуске поршневых манометров из производства масса грузов рассчитывается из условия $m = p_n \cdot F / g$, где p_n — номинальное („круглое“) значение давления.

Если ускорение свободного падения в месте измерений заранее не известно, то масса грузов обычно подгоняется под нормальное ускорение свободного падения $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$. Поэтому при эксплуатации поршневого манометра в месте измерений с ускорением свободного падения g в показания прибора необходимо ввести поправку:

$$\Delta p = p \left(\frac{g}{g_n} - 1 \right); \quad (10.4.6)$$

или:

$$\delta_g = \frac{\Delta p}{p} = \frac{g}{g_n} - 1; \quad (10.4.7)$$

В пределах нашей страны указанная поправка может быть довольно большой. Например, если $g = 9,822 \text{ м/с}^2$, поправка составляет $\delta_g = 0,15\%$.

Следует отметить, что так же, как и для жидкостных манометров, значение нормального ускорения свободного падения $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2$ обусловлено применением старых единиц давления (кгс/см², мм рт.ст., мм вод.ст.). После перехода на единицу давления „Па“ международной системы единиц понятие „нормальное ускорение свободного падения“ теряет смысл. Поэтому в

формулах вместо g_n может, в принципе, использоваться любое „круглое” расчетное значение ускорения свободного падения g_p (9,80; 9,81 м/с²), приемлемое для региона, в котором будет использоваться поршневой манометр. При этом выбранное значение ускорения свободного падения должно быть указано в свидетельстве о поверке.

Поправка на потерю массы грузов в воздухе. Согласно закону Архимеда, на грузы, наложенные на поршень при измерениях, со стороны окружающего воздуха действует подъемная сила, равная весу воздуха в объеме, занимаемом грузами, т. е.:

$$G_g = V_2 \cdot \rho_g \cdot g; \quad (10.4.8)$$

где $V_2 = m / \rho$ — объем грузов; ρ_g — плотность воздуха.

Поэтому масса грузов, уравнивающая измеряемое давление, уменьшится на G_g , а давление:

$$p = \frac{mg}{F} \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho}\right); \quad (10.4.9)$$

Поправка на потерю массы грузов в воздухе

$$\delta_g = -\rho_g / \rho; \quad (10.4.10)$$

При атмосферном давлении 100 кПа плотность воздуха $\rho_g = 1,2$ кг/м³; для остальных грузов $\rho = 7,85 \cdot 10^3$ кг/м³. Тогда поправка $\delta_g = -0,015$ %, что необходимо учитывать при высокоточных измерениях.

Таким образом, действительное значение давления, воспроизводимого грузопоршневым манометром, в общем случае:

$$p = \frac{mg_p}{F_{20}} (1 + \delta_t + \delta_p + \delta_g + \delta_g); \quad (10.4.11)$$

где F_{20} — эффективная площадь поршня при $t = 20^\circ\text{C}$; g_p — расчетное значение ускорения свободного падения; δ_t , δ_p и δ_g — относительные значения поправок в соответствии с формулами.

В поверочной практике для удобства эксплуатации введение поправок в процессе измерений нежелательно. В этих целях влияние температуры сводится к необходимому минимуму ограничением диапазона температур в условиях поверки, а остальные поправки учитываются соответствующей подгонкой массы грузов при изготовлении поршневого манометра или при его применении в другом месте.

Согласно формуле расчетное значение массы грузов должно быть:

$$m_{pac} = \frac{p_{pac} F_{20}}{g_{pac}} [1 - (\delta_p + \delta_g + \delta_g)]; \quad (10.4.12)$$

где $p_{рас}$ – расчетное измеряемое давление; $g_{рас}$ – расчетное ускорение свободного падения.

Если поправкой на деформацию поршневой пары под действием давления δ_p можно пренебречь, а расчетное ускорение свободного падения $g_{рас}$ соответствует местному ускорению свободного падения g , то:

$$m_{рас} = p_{рас} \cdot \frac{F_{20}}{g} \left(1 + \frac{\rho_в}{\rho}\right); \quad (10.4.13)$$

Заслуживает внимания и другой способ компенсации поправок δ_g и $\delta_в$, согласно которому последняя производится путем соответствующего выбора эффективной площади поршня. При этом грузы подгоняются под номинальные значения в единицах массы, что упрощает их поверку и позволяет применять при измерениях стандартные разновесы. Расчетная эффективная площадь поршня в этом случае:

$$F_{20} = \frac{m_n \cdot g}{p_{рас}} \left(1 - \frac{\rho_в}{\rho}\right); \quad (10.4.14)$$

где m_n — масса грузов, подогнанных под номинал.

При воспроизведении грузопоршневым манометром давлений, кратных единице давления Па, в соответствии спервым способом масса груза, соответствующая, например, давлению $p = 100$ кПа, при $g = 9.8155$ м/с² и $F_{20} = 1 \cdot 10^{-4}$ м² будет равна $m_{рас} = 1 \cdot 10^5$ Па \times $(1 \cdot 10^{-4}$ м²/9,8155 м/с²) \cdot $(1 + 0,00015) = 1,01895$ кг.

В соответствии со вторым способом при $m = 1$ кг и прочих равных условиях эффективная площадь поршня должна быть равна $F_{20} = (1 \text{ кг} \cdot 9,8155 \text{ м/с}^2) / (1 \cdot 10^5 \text{ Па}) (1 - 0,00015) = 0,98140 \cdot 10^{-4}$ м², т. е. меньше, чем в первом случае примерно на 1,9 %.

Это позволяет изготавливать такие поршневые пары при помощи имеющейся на заводах-изготовителях технологической оснастки без существенных дополнительных затрат.

Суммарная относительная погрешность поршневого манометра согласно уравнению измерений с учетом дополнительных погрешностей:

$$\delta_p = \delta_N + \delta_F + \sum \delta_i; \quad (10.4.15)$$

где δ_N – относительная погрешность определения силы, необходимой для уравнивания измеряемого давления; δ_F – относительная погрешность определения эффективной площади поршня; $\delta_F \sum \delta_i$ – дополнительные погрешности.

Основные погрешности поршневых манометров δ_N и δ_F , обусловленные поршневым методом измерения давления, имеют место для приборов всех типов.

Погрешность определения силы, уравнивающей измеряемое давление, зависит от способа уравнивания. Для наиболее часто применяемого способа уравнивания веса грузов относительная погрешность:

$$\delta_N = \delta_m + \delta_g ; \quad (10.4.16)$$

где δ_m – относительная погрешность определения массы грузов; δ_g – относительная погрешность определения ускорения свободного падения в месте измерений.

Современная техника измерения массы и ускорения обеспечивает достаточно высокую точность измерений. Погрешности δ_m и δ_g без особых затруднений могут быть доведены до уровня $10^{-5} - 10^{-6}$. Поэтому указанные погрешности выбираются, исходя из соответствия их требуемой суммарной погрешности измерений. Отечественными и международными стандартами регламентировано, что δ_m не должно превышать 20 % суммарной погрешности, а δ_g – 10%. Дальнейшее уменьшение погрешности δ_m неоправданно, так как при этом повысится трудоемкость изготовления и поверки грузов. В отношении погрешности δ_g необходимо отметить, что она при высокоточных измерениях (сравнениях поршневых и жидкостных манометров друг с другом) взаимно исключается.

Наиболее весома погрешность определения эффективной площади поршня δ_F , которая составляет 40—50 % суммарной погрешности. За исключением поршневых манометров, применяемых в качестве первичных эталонов, эта погрешность в подавляющем большинстве случаев обуславливается погрешностями, связанными с определением эффективной площади поршня путем сличения показаний поверяемого манометра с показаниями манометра более высокого класса точности. Указанные погрешности — погрешности уравнивания; порог реагирования; погрешности, вызываемые воздействием условий поверки и капиллярными явлениями, а также налипанием смазывающей жидкости на поверхности поршня — носят случайный характер. Однако погрешность определения эффективной площади поршня δ_F является систематической в принципе, так как значение эффективной площади поршня F , записанное в свидетельство о поверке, отличается от истинного значения на постоянное значение. Это относится также и к погреш-

ностям значения ускорения свободного падения δ_g и массы грузов δ_m . Правда, последняя погрешность может иметь и случайную составляющую, связанную с произвольным подбором грузов при уравнивании измеряемого давления.

Таким образом, основные погрешности поршневого манометра δ_m , δ_g и δ_F носят систематический характер, что и определяет высокую стабильность показаний грузопоршневых манометров.

Дополнительные погрешности $\sum \delta_i$, как было указано выше, носят в основном случайный характер.

В процессе уравнивания давления возникает погрешность, связанная с отклонением наблюдаемого положения поршня от действительного положения равновесия, что обуславливается инерционностью поршневой системы и временем наблюдения, порогом реагирования, точностью отсчетного устройства и другими причинами.

Погрешности, вызываемые условиями поверки, обуславливаются, в основном, точностью определения температуры поршневой пары и ее изменениями за время измерения. В соответствии с эта погрешность:

$$\delta_t = (\alpha + \beta) \cdot \Delta t ; \quad (10.4.17)$$

где Δt - погрешность определения температуры.

Для стальных поршня и цилиндра при $\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$ погрешность $\delta_t = 1,2 \cdot 10^{-5}$ ($\sim 0,001\%$), которой для приборов классов точности 0,02 и 0,05 можно пренебречь. Однако для измерений эталонного уровня погрешность измерения температуры Δt не должна быть $\leq 0,1^\circ\text{C}$.

Влияние смазывающей жидкости. На границе свободной поверхности смазывающей жидкости и боковой поверхности поршня вдоль его оси действуют капиллярные силы, которые можно оценить по формуле $P_k = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \theta$, где r - радиус поршня; σ — коэффициент поверхностного натяжения; θ - угол смачивания. Эквивалентное этой силе давление равно:

$$\Delta p_k = \frac{P_k}{\pi r^2} = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r} ; \quad (10.4.18)$$

а соответствующая относительная погрешность измерения давления:

$$\delta_k = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{p \cdot r} ; \quad (10.4.19)$$

Для смазывающих жидкостей (минеральное масло, керосин) коэффициент поверхностного натяжения $\sigma \approx 0,03$ Н/м, а угол смачивания в худ-

шем случае составляет $\theta = 0$ ($\cos \theta = 1$). При эффективной площади поршня $F_{\text{yo}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 1 \text{ см}^2$ давление, эквивалентное влиянию поверхностного натяжения $\Delta p_{\kappa} \leq 0,1 \text{ гПа}$, что существенно при точном измерении ($\delta < 0,01 \%$) давлений, значения которых менее $p = 100 \text{ кПа}$ (атмосферное давление). В этих случаях применяются поршневые пары с эффективной площадью от 2 до 20 см^2 , чем сводится к минимуму влияние неопределенности поверхностного натяжения. Суммарное влияние случайных дополнительных погрешностей нормируется так, чтобы $\sum \delta_i \leq 0,3 \delta$, т. е. не более 30 % погрешности измерений поршневых манометров. Указанное легко достигается для образцовых поршневых манометров классов 0,02 и 0,05, а на эталонном уровне случайные погрешности исключаются увеличением количества измерений. При измерении давлений $p > 1 \text{ МПа}$ влияние дополнительных погрешностей незначительно.

Грузопоршневые манометры отличаются высокой точностью и широким диапазоном измерений и используются исключительно в качестве образцовых приборов. Манометры 1-го, 2-го и 3-го разрядов имеют классы точности 0,02; 0,05 и 0,2. Принцип действия этих манометров основан на уравнивании измеряемого давления с помощью аттестованных грузов. Устройство образцового манометра с простым неуплотненным поршнем показано на рисунке 10.4.1.

В цилиндрическом канале стойки 6 находится поршень 7, верхний конец которого имеет тарелку 9 для установки сменных аттестованных грузов 8.

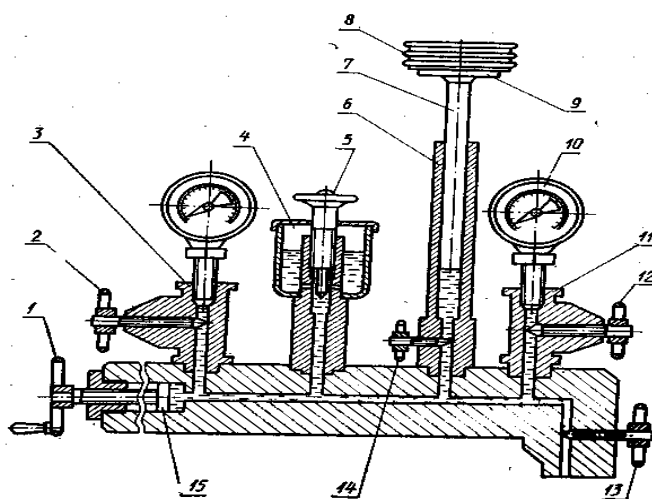


Рисунок 10.4.1 – Схема грузопоршневого манометра

Канал колонки сообщается с полостью цилиндра винтового пресса 15 и с двумя штуцерами 3 и 11, предназначенными для установки пружинных манометров 10. Каналы стойки и штуцера имеют запорные вентили 14, 2 и 12. Для слива рабочей жидкости предусмотрен канал с запорным вентилем 13.

13. В качестве рабочей жидкости используется трансформаторное или вазелиновое масло, которым заполнена вся система, а также резервуар 4, который может отключаться от системы вентилем 5. На поршень 7, свободно перемещающийся в канале колонки 6, действуют две противоположно направленные силы: сила давления жидкости и вес положенных на поршень грузов.

$$P = \frac{G + G_1}{S} ; \quad (10.4.1)$$

При равновесии поршня, где G и G_1 — вес поршня и аттестованных грузов; S — площадь поршня. Формула справедлива в случае, когда можно пренебречь силой трения, возникающей при движении поршня по каналу стойки. Наличие трения между поршнем и стенками канала требует строго вертикальной установки манометра.

10.5 Деформационные манометры

Поверку деформационных (пружинных) приборов производят для определения их пригодности и установления класса точности как при выпуске прибора из производства при выпуске прибора периодически во время применения или хранения.

Поверка включает внешний осмотр прибора для обнаружения «иного брака и определенно погрешности. Для определения наличия упругого последействия прибор выдерживается в течение 5 минут под давлением, уменьшенным на 5—10% по сравнению с верхним пределом измерения. При выборе образцового прибора, по которому должна проводиться поверка рабочего манометра, необходимо руководствоваться следующими положениями: а) верхний предел измерений образцового прибора должен быть не менее верхнего предела поверяемого прибора; б) предел допускаемой основной абсолютной погрешности образцового прибора должен быть не более 1/4 предела допускаемой основной абсолютной погрешности поверяемого прибора Δ' при давлении, соответствующем поверяемой отметке шкалы. В качестве устройства для сжатия среды используется пресс. Приборы с предельным давлением до 0,16 МПа (1,6 кгс/см²) можно поверять сжатым воздухом; в качестве образцового прибора могут применяться ртутные манометры и вакуумметры. При поверке манометров с пределом измерения выше 0,16 МПа (1,6 кгс/см²) применяется масляный пресс, заполненный трансформаторным или вазелиновым маслом. Для поверки рабочих манометров может быть применен поршневой манометр. При поверке определяются абсолютная погрешность Δ и вариация показаний. Абсолютная погрешность определяется как разность между показанием поверяемого прибора и действительным зна-

чением давления, определяемым по показанию образцового прибора. Если образцовым прибором является пружинный манометр, то определение действительного значения давления производится при легком постукивании по его корпусу. Вариация показаний определяется как разность показаний поверяемого прибора при повышении и понижении давления при одном и том же действительном значении измеряемой величины. Она не должна превышать допустимого значения абсолютной погрешности средства измерения.

10.6 Тензорезисторные измерительные преобразователи давления

Измерительные преобразователи давления, оснащенные преобразовательными элементами тензорезисторного типа получили название тензорезисторных измерительных преобразователей давления. Преобразователи давления этого вида представляют собой деформационный чувствительный элемент, чаще всего мембрану, на которую наклеиваются или напыляются тензорезисторы. В основе принципа работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, суть которого состоит в изменении сопротивления проводников и полупроводников при их деформации. Связь между изменением сопротивления тензорезистора и его деформацией устанавливается соотношением

$$\frac{\Delta R}{R} = k_{\tau} \frac{\Delta l}{l}; \quad (10.6.1)$$

где $\Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления тензорезистора; k_{τ} – постоянный коэффициент, определяемый материалом тензорезистора; $\Delta l/l$ – относительное изменение длины тензорезистора.

Получили распространение проволочные и фольговые тензорезисторы, изготавливаемые из проводников типа манганина, нихрома, константана, а также полупроводниковые тензорезисторы, изготавливаемые из кремния и германия *p*- и *n*-типов. Сопротивление тензорезисторов, изготавливаемых из проводников, составляет 30–500 Ом, а сопротивление полупроводниковых тензорезисторов от $5 \cdot 10^{-2}$ –10 кОм.

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать тензорезисторы непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счет молекулярных сил позволяют отказаться от использования клеящих материалов и улучшить метрологические характеристики преобразователей. На рисунке 10.6.1, *a* показана сапфировая мембрана *Зс* расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами *p*-типа с положительной *1* и отрицательной *2* чувствительностями. Положительной чувствитель-

ностью обладает тензорезистор, у которого отношение $\Delta R/R > 0$, если же $\Delta R/R < 0$ – чувствительность отрицательна. Структура однополоскового тензорезистора приведена на рисунке 10.6.1, б. Здесь 1 – тензорезистор; 2 – защитное покрытие; 3 – металлизированные токоведущие дорожки; 4 – упругий элемент преобразователя (сапфировая мембрана). Тензорезисторы можно располагать на мембране так, что при деформации они будут иметь разные по знаку приращения сопротивления. Это позволяет создавать мостовые схемы, в каждое из плеч которого включаются тензорезисторы с соответствующим значением $\Delta R/R$, а также термокомпенсационные элементы.

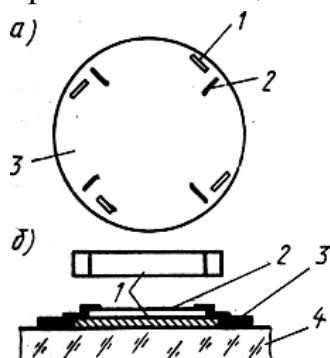


Рисунок 10.6.1- Схемы тензорезисторных чувствительных элементов

На рисунке 10.6.1, а показана схема тензорезисторного измерительного преобразователя разности давления. Мембранный тензомодуль 4 представляет собой металлическую мембрану, к которой сверху припаяна сапфировая мембрана с напыленными четырьмя кремниевыми тензорезисторами, образующими плечи неравновесного моста. Тензомодуль закреплен на основании 2 и отделен от измеряемой среды двумя разделительными металлическими мембранами 1 и 3. Замкнутые полости между тензомодулем и мембранами заполнены полиметилсилоксановой жидкостью. Измеряемая разность давлений $P_1 - P_2$ воздействует на тензомодуль через указанные мембраны и жидкость. Через герметичные выводы 5 тензомодуль подключается к встроенному электронному устройству 6. С помощью этого устройства изменение сопротивления тензорезисторов преобразуется в унифицированный токовый выходной сигнал (0–5, 0–20 или 4–20 мА), который передается по искробезопасной двухпроводной линии дистанционной передачи к блоку питания 7. Последний, устанавливается во взрывобезопасном помещении и обеспечивает питание первичного преобразователя по двухпроводной линии. По этой же линии одновременно передается выходной токовый сигнал. Наряду с указанной функцией блок питания повышает мощность выходного сигнала до уровня, необходимого для подключения внешней нагрузки R_n , и формирует заданный уровень выходного сигнала (0–5, 0–20 или 4–20 мА). В тензорезисторных преобразователях избыточного давления, абсолютного давления и

разрежения используются измерительные блоки, аналогичные рассмотренным. Отличие состоит в том, что измерительный преобразователь подключается к объекту «плюсовой» камерой, а «минусовой» сообщается с атмосферой. У измерительных преобразователей абсолютного давления «минусовая» камера вакуумирована.

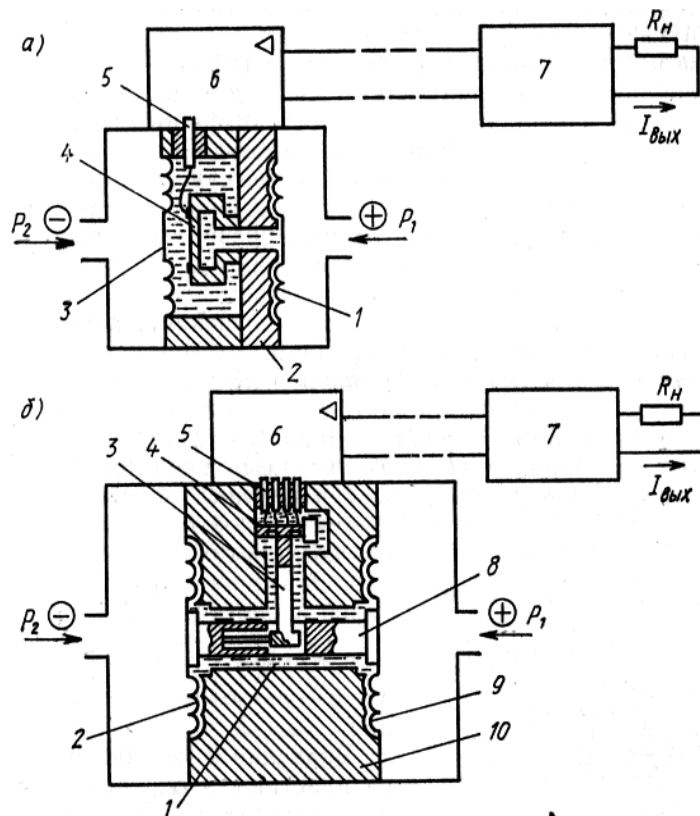


Рисунок 10.6.2- Схемы тензорезисторных измерительных преобразователей разности давлений с унифицированным токовым выходным сигналом

Тензорезисторный измерительный преобразователь давления с тензомодулем рычажно-мембранного типа показан на рисунке 10.6.2, б. Тензомодуль рычажно-мембранного типа 3 размещен в заполненной полиметилсилоксановой жидкостью замкнутой полости 1 и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 2 и 9. Мембраны по наружному контуру приварены к основанию 10 и соединены между собой центральным штоком 8, который связан с концом рычага тензомодуля. Разность давлений вызывает прогиб мембран 2 и 9 тензомодуля 3, что сопровождается изменением сопротивления тензорезисторов 4. Электрический сигнал с тензомодуля через герметичные выводы 5 подается во встроенное электронное устройство б, которое связано с блоком питания 7. Назначение блока питания аналогично рассмотренному. Классы точности тензорезисторных измерительных преобразователей избыточного давления, разрежения и разности давлений 0,6; 1,0; 1,5. Время установления выходного сигнала при скачкообразном изме-

нении измеряемого параметра 0,5 и 2,5 с. Диапазоны измерений: избыточного давления – от 0 – 10^{-3} до 0 – 60 МПа; разрежения – от -1 – 0 до -10 – 0 кПа; абсолютного давления – от 0 – 2,5 кПа до 0 – 2,5 МПа; разности давлений – от 0 – 1 кПа до 0 – 2,5 МПа.

Кроме рассмотренных разработана модификация тензорезисторного преобразователя, предназначенного для измерения избыточного давления. Преобразователь имеет унифицированные токовые сигналы 0 – 5, 0 – 20, 4 – 20 мА. Классы точности преобразователя 0,25; 0,5; 1,0. Диапазоны измерений избыточного давления от 0 – 2,5 кПа до 0 – 100 МПа.

10.7. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи давления

В основу работы этих преобразователей положено преобразование измеряемого давления в усилие посредством деформационного чувствительного элемента и последующего преобразования этого усилия в сигнал измерительной информации пьезоэлектрическим преобразовательным элементом. Принцип действия пьезоэлектрического преобразовательного элемента основан на пьезоэлектрическом эффекте, наблюдаемом у ряда кристаллов, таких, как кварц, турмалин, титанат бария и др. Суть пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что если кварцевые пластины X-среза подвергнуть сжатию силой N , то на ее поверхности возникнут заряды разных знаков. Значение заряда Q связано с силой N соотношением

$$Q = kN; \quad (10.7.1)$$

где k – пьезоэлектрическая постоянная.

Значение k не зависит от размера пластины и определяется природой кристалла. Для кварца $k = 2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

На рисунке 10.7.1 показана схема пьезоэлектрического измерительного преобразователя давления. Измеряемое давление преобразуется мембраной 4 в усилие, вызывающее сжатие столбиков кварцевых пластин 2 диаметром 5 мм и толщиной 1 мм. Возникающий электрический заряд Q через выводы 1 подается на электронный усилитель 5, обладающий большим входным сопротивлением – 10^{13} Ом. Значение заряда связано с измеряемым давлением P зависимостью

$$Q = kFP; \quad (10.7.2)$$

где F – эффективная площадь мембраны.

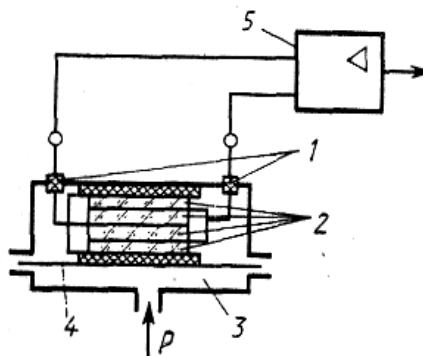


Рисунок 10.7.1- Схема пьезоэлектрического измерительного преобразователя давления

Для уменьшения инерционности преобразователя объем камеры 3 минимизируют.

Так как частота собственных колебаний системы «мембрана–кварцевые пластины» составляет десятки килогерц, то измерительные преобразователи этого типа обладают высокими динамическими характеристиками, что обусловило их широкое применение при контроле давления в системах с быстропротекающими процессами.

Чувствительность пьезоэлектрических измерительных преобразователей давления может быть повышена путем применения нескольких, параллельно включенных кварцевых пластин и увеличения эффективной площади мембраны.

Верхние пределы измерений пьезоэлектрических преобразователей давления с кварцевыми чувствительными элементами 2,5 – 100 МПа. Классы точности 1,5; 2,0. Из-за утечки заряда с кварцевых пластин преобразователи давлений этого типа не используются для измерения статических давлений.

11. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

11.1 Основные положения

Термометры сопротивления (терморезисторы) в настоящее время широко применяются для измерения температуры в диапазоне от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Они относятся к одним из наиболее точных преобразователей температуры. Например, платиновые терморезисторы позволяют измерять температуру с погрешностью порядка $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$. Работа их основана на свойстве металлических и полупроводниковых материалов изменять электросопротивление с изменением их температуры. Величина, характеризующая изменение сопротивления материалов в зависимости от температуры, называется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который определяется

по формуле:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0}; \quad (11.1.1)$$

где α — ТКС, K^{-1} (или $^{\circ}C^{-1}$); R_0 и R_t — электросопротивление при температуре соответственно 0 и $t^{\circ}C$, Ом.

11.2 Металлические термометры сопротивления

Конструктивно металлический термометр сопротивления представляет собой чувствительный элемент из проволоки 1, бифилярно намотанной на каркас 2 из изоляционного материала (рисунок 11.2.1). Проволока токопроводящими проводами присоединена к зажимам 3 головки термометра. Чувствительный элемент помещен в защитный чехол 4, предохраняющий его от прямого контакта со средой, температуру которой измеряют.

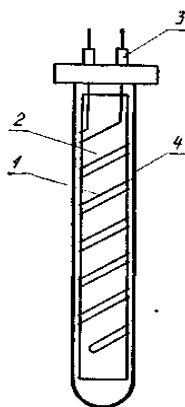


Рисунок 11.2.1 – Металлический термометр сопротивления

Материал, из которого изготавливают чувствительный элемент, должен быть химически инертным, не изменять своих физических свойств при нагреве и не окисляться при взаимодействии с окружающей средой, ТКС должен быть по возможности устойчивым и высоким. Свойства материала должны быть легко воспроизводимы от партии к партии. Сопротивление должно быть связано с температурой простой зависимостью (предпочтительно линейной). В целях уменьшения габаритов чувствительного элемента желательно, чтобы удельное сопротивление было высоким. Таким условиям отвечает платина, медь и в меньшей степени никель и железо. Некоторые характеристики металлов, применяемых для изготовления терморезисторов, приведены в таблице 11.2.1.

Таблица 11.2.1

Материал	ТКС α в диапазоне 0—100°C	Удельное сопротивление ρ при 20°C, <i>мкОм·м</i>	Температура плавления, °C
Платина	0,0039	0,105	1773
Медь	0,00426	0,017	1083
Никель	0,0063	0,08	1455

Соединительные провода изготавливают из материалов, которые обладают достаточной химической стойкостью и развивают незначительную термоэдс в паре с материалом чувствительного элемента. Для платиновых чувствительных элементов провода изготавливают из серебра, для медных — из меди.

Защитный чехол (арматура) — должен быть выполнен из жароустойчивого и достаточно прочного материала. Кроме того, материал должен быть химически стойким при нагревании, чтобы не загрязнять чувствительный элемент. Чаще всего чехол делают из коррозионностойких и жаропрочных сталей, например Х18Н9Т, иногда (для лабораторных термометров) из стекла, фарфора или кварца.

В зависимости от назначения металлические термометры сопротивления подразделяются на эталонные, образцовые и рабочие. Последние в свою очередь подразделяются на лабораторные и технические.

Чувствительные элементы эталонных, образцовых и в большинстве случаев лабораторных термометров сопротивления изготавливают из платиновой проволоки. Технические приборы имеют чувствительные элементы, изготовленные из платины, меди и реже никеля.

Основными характеристиками чувствительных элементов термометров сопротивления являются чувствительность, взаимозаменяемость термоэлектрических свойств и инерционность. Эти характеристики в некоторой мере зависят от сопротивления чувствительного элемента, которое принято характеризовать при 0°C (R_0). При проволоке одинакового диаметра размеры, инерционность и стоимость чувствительного элемента будут тем меньше, чем меньше его сопротивление R_0 . Однако в этом случае необходимо применять более чувствительные и сложные вторичные приборы. Увеличение сопротивления R_0 чувствительного элемента упрощает работу с термометром, так как позволяет применять более простые вторичные приборы.

В нашей стране серийно выпускались платиновые (ТСП) и медные (ТСМ) технические термометры сопротивления. Термометры ТСП предна-

значены для измерения температуры в интервале от -200 до $+1200^{\circ}\text{C}$, а ТСМ — от -50 до $+180^{\circ}\text{C}$.

Номенклатура выпускаемых термометров сопротивления очень широка. В зависимости от назначения и конструкции они подразделяются по многим признакам, в том числе: по точности — на термометры классов I, II, III; по инерционности — с малой инерционностью (постоянная времени t менее 9 с), средней инерционностью ($t < 80$ с), большой инерционностью (t до 4 мин) и ненормированной инерционностью; по количеству чувствительных элементов — на одинарные и двойные.

Конструктивно термометры сопротивления обычно выполнены из платиновой (диаметром 0,05—0,07 мм) или медной изолированной (диаметром 0,1 мм) проволоки, намотанной на каркас в виде пластинки из слюды или, у медных термометров, на цилиндрический пластмассовый каркас, покрытый глифталевым лаком. К обоим концам платиновой или медной проволоки приваривают или припаивают подводящие провода диаметром 1 мм, соединяющие чувствительный элемент с зажимами на головке термометра, с помощью которых последний подключают к измерительной аппаратуре. Подводящие провода изолируют друг от друга фарфоровыми бусами или трубками и асбестовым шнуром. Чувствительный элемент вместе с подводящими проводами помещают в тонкостенную металлическую трубку. Если термометр предназначен для работы при низких температурах, то эта трубка в целях предупреждения конденсации влаги и замыкания витков чувствительного элемента герметизируется (например, заливается парафином).

Для уменьшения тепловой инерционности выпускают термометры сопротивления, у которых элемент, собранный на пластинке из слюды, закрыт с двух сторон слюдяными пластинками и зажат в трубке между двумя упругими элементами — S-образной формы из красной меди или алюминия. Они улучшают теплопередачу от трубки к чувствительному элементу.

Термометр помещают в защитную арматуру, которая состоит из трубки-чехла с резьбовым штуцером.

11.3 Манометрические газовые термометры

Действие манометрического газового термометра основано на зависимости давления газа в постоянном объеме от его температуры. Принципиальная схема газового термометра такая же, как жидкостного манометрического термометра (рисунок 11.3.1). Термоприемник, капилляр и манометрическая трубка заполнены инертным газом (обычно азотом) под давлением 10-40 ат. При изменении температуры термоприемника изменяется и давление газа в

системе, вызывающее соответствующую деформацию манометрической трубки и перемещение ее свободного конца.

Если пренебречь отклонением реального газа от законов идеальных газов, пренебречь изменением объема системы, связанным с деформацией термомприемника, капилляра и манометрической трубки от действия давления и температуры, и считать, что температура газа во всех частях системы одинакова, то зависимость давления от температуры выразится уравнением

$$p = p_0 \frac{T}{T_0}; \quad (11.3.1)$$

где p – давление при абсолютной температуре T ; p_0 – давление при абсолютной температуре T_0 .

Это уравнение можно записать в виде

$$p = p_0 \left(1 + \frac{t - t_0}{t_0 + 273} \right); \quad (11.3.2)$$

где t и t_0 – температуры в °С.

Из выражений видно, что при указанных выше условиях давление линейно зависит от температуры.

В реальных условиях измерения температура воздуха, окружающего капилляр и манометрическую трубку, может отличаться от измеряемой температуры той среды, в которую помещен термомприемник. Тогда давление в системе будет зависеть не только от температуры термомприемника, но и от температуры манометрической трубки и капилляра. Если абсолютная температура манометрической трубки и капилляра постоянна и равна T_0 , то характеристика термосистемы, т.е. зависимость давления от температуры термомприемника T , будет

$$p = p_0 \frac{T}{T_0} \cdot \frac{1 + \frac{V_{mk}}{V}}{1 + \frac{V_{mk}}{V} \cdot \frac{T}{T_0}}; \quad (11.3.3)$$

где V – объем термомприемника;

V_{mk} – объем манометрической трубки с капилляром.

При отклонении температуры трубки и капилляра от температуры T_0 , при которой производилась градуировка или поверка термометра, возникает погрешность показаний прибора. Если температура трубки и капилляра выше

T_0 , погрешность будет положительна. Для уменьшения величины погрешности объем термодатчика должен быть достаточно большим (обычно объем термодатчика равен 50–150 см³ и в 15–50 раз превышает объем капилляра). Кроме того, принимаются меры для предотвращения больших колебаний температуры капилляра и манометрической трубки (например, теплоизоляция капилляра). Применяется также биметаллическая температурная компенсация, снижающая погрешность от изменения температуры манометрической трубки.

Изменение атмосферного давления незначительно влияет на показания прибора благодаря тому, что газ в системе находится под значительным давлением (10–40 МПа).

Упругим чувствительным элементом технических газовых термометров обычно служит винтовая многорезцовая манометрическая трубка. Капилляр газового термометра может иметь длину до 40–60 м. При очень большой длине капилляра необходимый объем термодатчика становится слишком большим и значительно возрастает тепловая инерция прибора.

Газовые термометры выпускаются показывающими, самопишущими, а также с электроконтактными и пневматическими устройствами для систем автоматического регулирования. Диапазон измеряемых температур от –130°С до +550°С. По своей точности технические газовые термометры соответствуют классам 1–1,5.

На рисунке 11.3.1 показано устройство одного из выпускаемых газовых термометров – самопишущего прибора типа ТГ. Цилиндрический термодатчик 1 погружен в измеряемую среду и соединен капилляром 2 с многорезцовой винтовой манометрической трубкой 3. Градуировочная характеристика термосистемы определяется уравнением, где T_0 – абсолютная температура капилляра и манометрической трубки, при которой производится регулировка приборов (эта температура равна 293°К, что соответствует +20°С). Конец манометрической трубки, к которому присоединен капилляр, впаян в держатель; второй конец прикреплен к скобе 4, жестко соединенной с осью 5. При изменении давления газа в трубке она деформируется, поворачивая ось. Угол поворота оси линейно зависит от давления.

Передающий механизм представляет собой шарнирный четырехзвенник, состоящий из рычага 6 с регулируемой кареткой 7, тяги 8 и поводка 10 с биметаллическим температурным компенсатором 11. На ведомой оси передаточного механизма закреплен мостик 12, несущий держатель пера 9. Запись производится чернилами на бумажной дисковой диаграмме. Диаграмма приводится во вращение со скоростью 1 об/сутки синхронным электродвигателем с редуктором или пружинным двигателем с часовым механизмом. Ча-

совой механизм применяется вместо синхронного электродвигателя для достижения взрывобезопасности прибора. Для применения в системах автоматического регулирования приборы типа ТГ выпускаются также с электроконтактными или пневматическими датчиками.

Длина капилляра может быть до 60 м. Термоприемник латунный, цилиндрической формы, снабжен футоркой с резьбой для монтажа в месте измерения. Наружный диаметр термоприемника 22 мм, длина 255 мм при длине капилляра до 40 м и 435 мм при длине капилляра свыше 40 м. В случае измерения температуры агрессивных сред или сред с высоким давлением термоприемник помещают в защитную гильзу из нержавеющей стали. Пространство между термоприемником и гильзой для уменьшения тепловой инерции заполняется жидкостью или металлическими опилками. Термометры ТГ имеют нижний предел измерений 0°С, верхние пределы – от 120 до 300°С. Шкала приборов равномерная.

Класс точности показывающих и самопишущих приборов – 1,5. Температурная погрешность не должна превышать 5% основной допустимой погрешности ($\pm 1,5\%$) на каждый градус отклонения температуры капилляра и трубки от градуировочной температуры 20°С.

В практике эксплуатации газовых термометров может иметь место нарушение герметичности газонаполненной системы. В результате постепенной утечки газа термометр будет давать заниженные показания, что не всегда можно сразу заметить. Поэтому газовые термометры требуют периодической проверки, обычно не реже чем 1 раз в месяц. Другим существенным недостатком газовых термометров являются большие размеры термоприемника, затрудняющие его установку в трубопроводах небольшого диаметра.

Несмотря на эти недостатки, газовые термометры широко применяются в промышленных установках, что объясняется их положительными качествами – простотой устройства, взрывобезопасностью, равномерностью шкалы и возможностью дистанционного измерения.

11.4 Манометрические паровые термометры

Схема манометрического парового термометра такая же, как жидкостного или газового (рисунок 11.4.1). Термоприемник заполняется низкокипящей жидкостью на $\frac{1}{2} - \frac{2}{3}$ его объема; остальную часть термоприемника заполняет насыщенный пар этой жидкости.

Капилляр и манометрическая трубка обычно заполняются той же жидкостью, и в некоторых приборах – другой, высококипящей жидкостью. Внутренний диаметр капилляра 0,3–0,4 мм, его длина – до 25 и даже 50 м. В диа-

пазоне рабочих температур термометра в термоприемнике всегда имеет место равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром.

Давление насыщенного пара однозначно зависит от температуры термоприемника. Это давление измеряется манометрической частью прибора. Среда, заполняющая капилляр и манометрическую трубку, служит передатчиком давления, независимо от того, жидкая она или газообразная.

Особенность парового термометра состоит в том, что температура капилляра и манометрической трубки совершенно не влияет на величину давления в системе. Действительно, если температура трубки и капилляра ниже температуры термоприемника, то в случае заполнения одной жидкостью трубка и капилляр будут заполнены жидкостью (конденсатом), и тепловое расширение этой жидкости, а также капилляра и трубки не повлияет на величину давления, а поведет только к увеличению или уменьшению объема, занимаемого в термоприемнике насыщенным паром. Если же температура капилляра и трубки выше температуры термоприемника, то в капилляре и трубке будет ненасыщенный пар под давлением, равным давлению насыщенного пара в термоприемнике.

Когда температуры капилляра и термоприемника сравниваются, имеет место конденсация пара в капилляре или, наоборот, быстрое испарение конденсата в нем, причем во время этих процессов наблюдается застой показаний термометра, несмотря на изменение температуры термоприемника. Однако практически это обстоятельство не имеет существенного значения, ибо, как правило, термометры работают при наличии более или менее значительной разности температур термоприемника и системы капилляр – манометрическая трубка.

Поэтому температурная погрешность манометрического парового термометра обусловлена только изменением жесткости манометрической трубы.

Благодаря независимости давления в системе от температуры капилляра и манометрической трубки отпадает необходимость в применении термоприемников большого объема. Обычно цилиндрический термоприемники паровых термометров имеют диаметр 10–15 мм при длине 60–120 мм. Малые размеры термоприемника позволяют устанавливать его в трубопроводах небольшого диаметра и способствуют снижению тепловой инерции прибора.

В паровых термометрах применяются различные рабочие жидкости, в зависимости от диапазона измерения. Рабочая жидкость выбирается так, чтобы ее критическая температура была выше верхнего предела измерения термометра, а при нижнем пределе измерения давление насыщенных паров было

бы значительно выше атмосферного (т.е. точка кипения жидкости при нормальном атмосферном давлении должна быть ниже нижнего предела измерения).

Деформация манометрической трубки пропорциональна избыточному давлению насыщенных паров жидкости, т.е. разности давления паров и атмосферного давления. Поэтому изменение атмосферного давления приводит к появлению погрешности показаний прибора. Для уменьшения этой погрешности необходимо, чтобы давление насыщенных паров рабочей жидкости в диапазоне измеряемых температур было бы значительно больше атмосферного давления.

Рабочая жидкость не должна быть агрессивной по отношению к материалам термодатчика, капилляра и трубки.

Некоторые применяемые жидкости и диапазоны измеряемых температур приведены в таблице 11.4.1.

Таблица 11.4.1

Рабочие жидкости паровых термометров и диапазон измеряемых температур

Рабочая жидкость	Химическая формула	Температура кипения в °С при давлении 760 мм рт. ст.	Диапазон измерения в °С	
			От	до
Углекислота	CO ₂	-78,5	-60	0
Фреон -12	CCl ₂ F ₂	-29,8	-20	40
Хлорметил	CH ₃ Cl	-24,0	0	120
Этиловый эфир	(C ₂ H ₅) ₂ O	+34,5	40	100
Ацетон	(CH ₃) ₂ CO	+56,2	60	200
Бензол	C ₆ H ₆	+80,1	90	250

Давление насыщенных паров жидкостей зависит от температуры нелинейно.

На рисунке 11.4.1 приведены графики абсолютного давления насыщенных паров хлорметила и ацетона в диапазоне 0–140 °С.

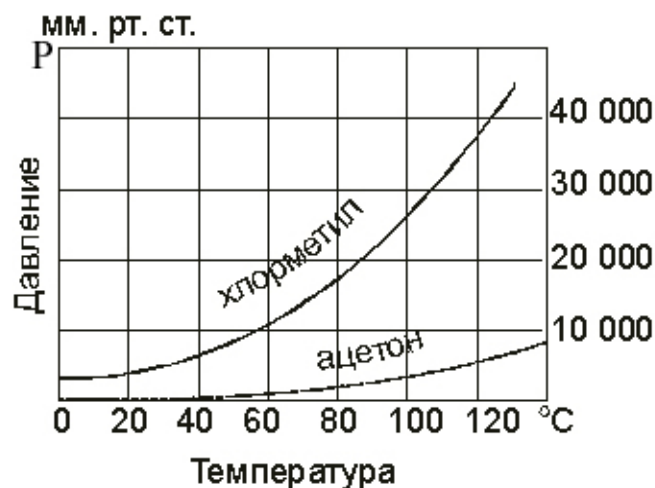


Рисунок 11.4.1 График зависимости давления насыщенных паров от температуры

Как видно из графиков, чувствительность термоприемника $S_1 = \frac{\partial p}{\partial t}$ возрастает с повышением температуры. Так как чувствительность манометрической трубки $S_2 = \frac{\partial \omega}{\partial p}$ в рабочем диапазоне давлений постоянна, то в случае применения передаточного механизма с постоянным передаточным отношением шкала парового термометра получается неравномерной, причем чувствительность прибора возрастает по мере приближения к верхнему пределу измерения. Например, термометр типа ТС с диапазоном измерения 0–100 °С (рабочая жидкость – хлорметил) имеет в интервале температур 80–100 °С чувствительность приблизительно в 4 раза болеевысокую, чем в интервале 0–20 °С. Для показывающих приборов это свойство нельзя считать отрицательным, если измерения проводятся главным образом в верхней половине шкалы. В некоторых приборах для получения равномерной шкалы применяются специальные выравнивающие устройства.

11.5 Стандартные градуировки термометров сопротивления

Условия эксплуатации технических термометров сопротивления требуют, чтобы при замене одного термометра другим была обеспечена взаимозаменяемость, т. е. при данной температуре сопротивление чувствительных элементов термометров должно быть одинаковым в пределах установленной допустимой погрешности. Взаимозаменяемость достигается введением так называемой стандартной градуировки, при которой все термометры одной градуировки имеют одинаковое сопротивление R_0 при 0°С и одинаковое значение ТКС (или отношение R_{100}/R_0). Целесообразность применения термометров со стандартной градуировкой состоит в том, что вторичные электроизмерительные приборы (логометры и автоматические мосты), в комплекте с

которыми применяются термометры сопротивления, могут быть проградуированы без предварительных вычислений и экспериментов, что обеспечивает взаимозаменяемость как самих термометров, так и вторичных измерительных приборов.

В таблице 11.5.1 представлены стандартные градуировки технических термометров, действующие в настоящее время, а в таблице 2 – классы точности термометров сопротивления.

Таблица 11.5.1

Тип термометра	Номинальное сопротивление при 0°C, Ом	Обозначение градуировочной характеристики	Диапазон температур
ТСП	1	1П	-50...+1100
	5	5П	-100...+1100
	10	10П	-200...+1000
	(46)	(гр.21)	-260...+1000
	50	50П	-260...+1000
	100	100П	-260...+1000
	500	500П	-260...+300
ТСМ	10	10М	-50...+200
	50	50М	-50...+200
	(53)	(гр.23)	-50...+180
	100	100М	-200...+200

Таблица 11.5.2

Тип термометра	Класс точности	Погрешность $\Delta R/R_0, \%$
ТСП	I	$\pm 0,05$
	II	$\pm 0,1$
	III	$\pm 0,2$
	IV	$\pm 0,4$
	V	$\pm 0,8$
ТСМ	I	-
	II	$\pm 0,1$
	III	$\pm 0,2$
	IV	$\pm 0,5$
	V	$\pm 1,0$

Сопротивление металлического термометра в интервале температур от -50 до +180°C выражается зависимостью:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t), \quad (11.5.1)$$

В соответствии с ГОСТ 6651-59 сопротивление выпускаемых в СССР технических платиновых термометров (ТСП) соответствует градуировкам гр. 20, гр. 21 и гр. 22. В зависимости от градуировки платиновые термометры имеют различное сопротивление при 0°С. Так, при градуировке по гр. 20 сопротивление термометра при 0°С $R_0=10$ Ом, по градуировке гр. 21 $R_0=41$ Ом, по градуировке гр. 22 $R_0=100$ Ом. Допустимые отклонения величины R_0 для термометров класса 1 $\pm 0,1\%$, для термометров класса 2 $\pm 0,1\%$.

В интервале температур 0 – 650°С сопротивление технических платиновых термометров выражается зависимостью:

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2); \quad (11.5.2)$$

а в интервале от -200 до 0°С формулой:

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3(t-100)); \quad (11.5.3)$$

где R_t - сопротивление термометра при t ; R_0 – сопротивление термометра при 0°С; α - температурный коэффициент сопротивления; $A=3,96847 \cdot 10^{-3}$ 1/град; $B=5,847 \cdot 10^{-7}$ 1/град²; $C=4,22 \cdot 10^{-12}$ 1/град⁴ – постоянные коэффициенты.

Из уравнений и видно, что характеристики платиновых термометров сопротивления не линейны, однако отклонение от линейной характеристики не превышает 5% в интервале от 0 до +500°С и 19% в интервале от 0 до +200°С.

11.6 Полупроводниковые терморезисторы

Наряду с металлическими терморезисторами в технике широко применяются полупроводниковые терморезисторы, называемые термисторами. Действие их основано на том свойстве полупроводниковых материалов, что количество носителей электрических зарядов в них зависит от температуры и значительно увеличивается с ее повышением. В результате этого электрическое сопротивление полупроводника с повышением температуры уменьшается. Термисторы изготавливают из спрессованных и спеченных смесей окислов некоторых металлов (марганца, меди, кобальта, железа и т. д.).

Термисторы отличаются от металлических терморезисторов меньшими размерами и значительно большими ТКС, достигающими значений порядка 2 — 8% на градус при 20 °С. Термисторы имеют отрицательный ТКС, который изменяется обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры: $\alpha = B/T^2$, где B — постоянная, имеющая размерность температуры и определяемая экспериментально для каждого типа термисторов.

Зависимость сопротивления от температуры достаточно точно описыва-

ется выражением: $R_T = A e^{\frac{B}{T}}$, где A — постоянная, имеющая размерность сопротивления.

В том случае, когда для применяемого термистора постоянные A и B неизвестны, но известны сопротивления R_1 и R_2 при температурах T_1 и T_2 , для вычисления сопротивления R_t и коэффициента B при любой другой температуре T можно воспользоваться формулами:

$$R_T = R_1 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}$$

$$B = \frac{T_2 T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} . \quad ; \quad (11.6.1)$$

Для некоторых типов термисторов B может принимать два разных значения при работе термистора в различных диапазонах температур.

Конструктивное оформление термисторов может быть самым разнообразным (рисунок 11.6.1 а). Термисторы КМТ-1, КМТ-4, ММТ-1 и ММТ-4 и др. представляют собой стержни из оксидных полупроводниковых материалов (медно-марганцевые для ММТ и кобальто-марганцевые для КМТ), покрытые эмалью и имеющие контактные колпачки и выводы. Термисторы ММТ-4 и КМТ-4 дополнительно заключены в металлический тонкостенный корпус и герметизированы. Некоторые термисторы (ММТ-9, ММТ-12, КМТ-17, СТЗ-17 и др.) выполнены в виде шайб диаметром от 5 до 19 мм. Малоинерционные термисторы (СТЗ-19, СТЗ-18, СТЗ-25) изготавливаются в виде бусинок диаметром 0,3—0,5 мм, вплавленных в стекло и снабженных проводочными выводами из металла с низкой теплопроводностью.

Важнейшими характеристиками термисторов являются: зависимость сопротивления от температуры; инерционность; вольт-амперная характеристика.

Типичный характер зависимости электрического сопротивления термистора от температуры показан на рисунке 11.6.1 б.

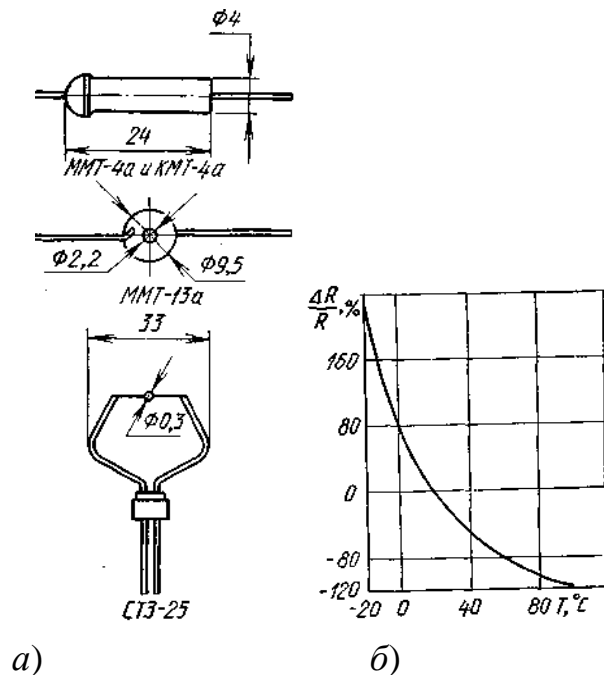


Рисунок 11.6.1 – Термистор (а); зависимость электрического сопротивления термистора от температуры (б)

Некоторые типы термисторов (СТ1-21, СТЗ-21) имеют специальную подогревную обмотку, электрически не связанную с термистором и служащую только для его подогрева. Такие приборы называются термисторами косвенного подогрева. При этом собственно термистор, включенный в одну электрическую цепь, может изменять свое сопротивление, а, следовательно, и ток в этой цепи в зависимости от силы тока в другой цепи, в которую включен подогреватель. Регулируя степень подогрева, удается существенно изменять вид вольт-амперной характеристики термистора.

Термисторы широко применяются в устройствах для измерения и регулирования температуры. В этой области они имеют ряд серьезных преимуществ в сравнении с другими преобразователями температуры: небольшую инерционность, высокую чувствительность, малые размеры, высокую механическую прочность при работе в условиях вибраций и больших ускорений. По сравнению с металлическими терморезисторами термисторы имеют значительно более широкий диапазон номинального электрического сопротивления (от 1 до 10 МОм).

Термисторы СТ7-1 могут применяться для измерения температуры в пределах от -100 до -196°C , а типа СТ12-1 — от $+600$ до $+1000^{\circ}\text{C}$. Погрешность измерения мала и имеет порядок 0,01 К и менее.

Область применения термисторов чрезвычайно широка. Помимо использования в качестве первичных измерительных преобразователей при измерениях температур, их применяют для измерения скорости потока газов и жид-

костей в расходомерах, разрежения в вакууме, относительной влажности и др. При этом используется эффект изменения условий теплоотдачи. Термисторы с релейными характеристиками (ЭКМТ-10 и К.МТ-11) применяются в устройствах теплового контроля. Термисторы служат не только для измерения, но и для автоматического изменения упомянутых выше характеристик среды, для чего показывающее или регистрирующее устройство заменяют соответствующим исполнительным органом. Термисторы широко применяются также в устройствах температурной компенсации и температурной стабилизации прибора.

Главным недостатком термисторов является значительный разброс параметров приборов даже в пределах одной и той же партии. Номинальное сопротивление приборов может для большинства типов термисторов иметь разброс до $\pm 20\%$ и лишь для некоторых типов укладывается в допуск $\pm 10\%$. Температурные коэффициенты сопротивления разных термисторов одного и того же типа могут также значительно отличаться, что не обеспечивает их взаимозаменяемости в термометрах, и каждый прибор требует индивидуальной градуировки.

11.7 Позисторы

Наряду с термисторами, имеющими отрицательный ТКС, в последнее время применяются новые полупроводниковые элементы, имеющие большой положительный ТКС в определенном интервале температур. Эти элементы называют позисторами. Позисторы изготавливаются на основе титаната бария с легирующими добавками. Имеются позисторы с температурным коэффициентом сопротивления, достигающим 50% на 1°C , т. е. в сравнительно узком интервале температур сопротивление позистора может увеличиваться на несколько порядков. Типичная кривая зависимости сопротивления позистора от температуры представлена на рисунке 11.7.1.

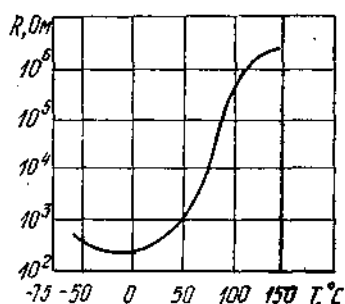


Рисунок 11.7.1 – Зависимость сопротивления позистора от температуры

Из этой кривой видно, что при относительно низких температурах ТКС позистора отрицателен, затем меняется на положительный. Сопротивление

позистора зависит не только от температуры, но и от напряжения, приложенного к нему, причем увеличение напряжения снижает сопротивление.

Позисторы пока еще не имеют широкого применения в приборах контроля температуры, но на их основе возможна разработка достаточно простых и надежных систем регулирования температурной и пожарной сигнализации, тепловой защиты и т. п. Кроме того, в электрических и электронных приборах позисторы могут быть основой для устройств тепловой стабилизации отдельных узлов или элементов, причем они могут одновременно выполнять функции миниатюрного нагревательного элемента и автоматического регулятора температуры.

12. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ВЕЩЕСТВА

12.1 Основные понятия и единицы

Расход — величина, определяемая отношением массы (массовый расход), количества (молярный расход) или объема (объемный расход) вещества, равномерно перемещаемого через определенное сечение, перпендикулярное направлению скорости потока, к промежутку времени, за которое это перемещение происходит. Как известно, вещества могут находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии. Состояние вещества определяется силами межмолекулярного взаимодействия и подвижностью частиц.

В отличие от твердых тел жидкие и газообразные (в гидромеханике они объединены единым термином «жидкости») способны изменять свою форму под действием очень малых сил. Жидкости по их механическим свойствам разделяют на мало сжимаемые (капельные) и сжимаемые (газообразные). Плотность, сжимаемость, вязкость - физические свойства жидкостей - оказывают существенное влияние на возможность точного измерения расхода.

Под сжимаемостью вещества понимают способность его изменять свой объем при увеличении давления. Существенное влияние на изменение объема вещества имеет температура среды.

12.2 Виды расходомеров

Расходомеры в зависимости от метода измерения можно разделить на приборы:

а) переменного перепада давления, связывающие изменение расхода вещества с перепадом давления, возникающим в специальном сужающем устройстве при переходе части потенциальной энергии потока в кинетическую;

б) постоянного перепада давления, у которых в зависимости от расхода вещества меняется положение вертикально перемещающегося поплавка, а соответственно и площадь проходного сечения прибора;

в) скоростного напора, определяющие расход по динамическому напору потока;

г) переменного уровня, связывающие расход вещества с высотой уровня жидкости в емкости при обеспечении ее свободного истечения;

д) расходомеры, в основу которых положены прочие методы измерения.

В настоящее время наибольшее распространение получили приборы переменного перепада, когда расход вещества определяется измерением статического давления (потенциальной энергии) вещества, проходящего через местное сужение в трубопроводе. В качестве первичных преобразователей таких измерительных устройств используются диафрагмы, нормальные сопла и сопла Вентури.

Нормальная диафрагма (рисунок 12.2.1) выполняется в виде тонкого диска, установленного в трубопроводе таким образом, что отверстие диска расположено концентрично с внутренним диаметром сечения трубопровода. Наличие диафрагмы в трубопроводе приводит к тому, что проходящий в ней поток вещества сужается перед диафрагмой. В сечении 2—2 это сужение становится максимальным вследствие действия сил инерции. По мере дальнейшего протекания вещества поток расширяется. Такой характер истечения вещества в трубопроводе приводит к образованию перед и за диафрагмой зон, характеризующихся вихревым движением вещества, причем зона У больше зоны Х (рисунок 12.1, а). На рисунке 12.1, б показано распределение статического давления в трубопроводе при установке сужающего устройства.

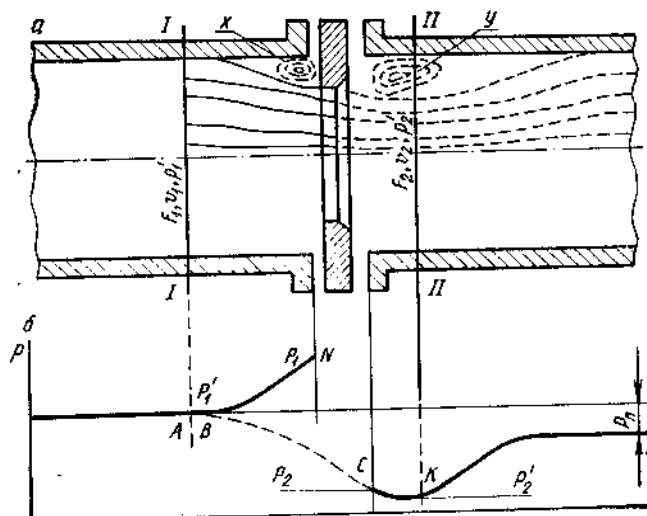


Рисунок 12.2.1- Распределение статического давления в трубопроводе

Наличие диафрагмы приводит к некоторому повышению давления у стенок трубопровода перед диафрагмой, которое затем падает до минимального за ней в наиболее узком сечении струи. С увеличением площади сечения потока наблюдается постепенное повышение давления у стенок, которое тем не менее не достигает p'_1

Рассмотрим диаграмму (рисунок 12.2.1, б), качественно характеризующую изменение давления потока по длине трубопровода. Давление струи ближе к оси трубопровода практически соответствует давлению у его стенок, за исключением участка BC , где давление при приближении к оси трубопровода уменьшается. Так, на участке AB давление струи практически постоянно; в результате подпирания действия диафрагмы давление у стенок трубопровода возрастает (BN) до p_1 , а непосредственно после диафрагмы падает до p_2 . Дальнейшее уменьшение давления до p'_2 (участок CK ,) связано с проявлением сил инерции потока. Затем происходит восстановление давления потока (KL). Разность давлений p_n при установившемся характере протекания вещества перед и после диафрагмы (остаточная потеря давления) обусловлена главным образом потерями энергии в результате трения и завихрений потока. Такой характер изменения давлений в трубопроводе характерен для всех типов сужающих устройств.

Для количественного описания процесса рассмотрим два сечения в трубопроводе 1-1 и 2-2 (рисунок 12.2.1, а).

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = F_0 v_0 \quad ; \quad (12.2.1)$$

v_1, v_2, v_0 - средние скорости в соответствующих сечениях потока.

Из уравнения следует, что:

$$\frac{F_0}{F_1} = \frac{v_1}{v_0} \quad \text{и} \quad \frac{F_2}{F_0} = \frac{v_0}{v_2} \quad ; \quad (12.2.2)$$

Отношение $\frac{F_0}{F_1} = m$ является модулем сужающего устройства, а

$\frac{F_2}{F_0} = \mu$ - коэффициентом сжатия струи, зависящего от вида сужающего устройства и свойств вещества, расход которого измеряется.

Таким образом, $v_1 = m v_0$, $v_0 = \mu v_2$ и, следовательно,

$$v_1 = m \mu v_2 \quad ; \quad (12.2.3)$$

Используя уравнение Бернулли, характеризующее закон сохранения энергии,

$$\frac{p'_1}{\rho} + k_1 \frac{v_1^2}{2} = \frac{p'_2}{\rho} + k_2 \frac{v_2^2}{2} + \xi \frac{v_2^2}{2} \quad ; \quad (12.2.4)$$

решая его относительно v_2 с учетом, получим:

$v_2 = \sqrt{\frac{\frac{2}{\rho}(p'_1 - p'_2)}{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}}$, где $\frac{p'}{\rho}$ - величина, характеризующая запас потенциальной энергии; $\frac{v^2}{2}$ - величина, характеризующая кинетическую энергию потока; ρ - плотность протекающей по трубопроводу среды; $\xi \frac{v_2^2}{2}$ - величина, характеризующая потери кинетической энергии на участке I-II; ξ - коэффициент сопротивления на участке I-II; k_1 и k_2 - коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скоростей в сечениях I-I и II-II; p'_1 и p'_2 абсолютные давления в сечениях F_1 и F_2 .

В реальных условиях измерение давления проводится непосредственно у стенок трубопровода, поэтому давления p'_1 и p'_2 заменяют на p_1 и p_2 :
 Приняв отношение $(p'_1 - p'_2)/(p_1 - p_2)$ равным ψ , выражение можно представить в следующем виде:

$$v_2 = \sqrt{\frac{\psi \frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} ; \quad (12.2.5)$$

Уравнение объемного расхода для несжимаемой жидкости

$$Q = F_2 v_2 = \mu F_0 v_2 ; \quad (12.2.6)$$

или с учетом

$$Q = \mu \sqrt{\frac{\psi \frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} ; \quad (12.2.7)$$

Величину $a = \mu \sqrt{\frac{\psi}{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}}$ называют коэффициентом расхода, который учитывает: а) распределение скоростей по сечению потока в зависимости от вязкости жидкости и вследствие ее трения о стенки трубопровода; б) погрешность, вызванную измерением давления не в центре потока, а у стенок трубопровода; в) замену в формуле трудно определяемой площади минимального сечения потока F_2 площадью сечения отверстия диафрагмы F_0 . Для различных типов сужающих устройств коэффициент расхода определяется опытным путем.

Таким образом, уравнения объемного ($\text{м}^3/\text{с}$) и массового ($\text{кг}/\text{с}$) расходов имеют вид:

$$Q = a \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)} ; \quad (12.2.8)$$

$Q_M = a\varepsilon F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}$, где ε – коэффициент, учитывающий изменение плотности потока вещества при его течении через сужающее устройство.

В качестве вторичных приборов при работе со стандартными сужающими устройствами применяются дифманометры.

12.3 Расходомеры постоянного перепада давления

Расходомеры данного типа предназначены для измерения объемного расхода жидкости или газа. Приборы этого типа ряд достоинств: а) высокую чувствительность; б) большой диапазон измеряемых расходов $Q_{\max}/Q_{\min} = 10$; в) незначительные потери давления; г) удобство для автоматизации процесса измерения. К недостаткам следует отнести: отсутствие взаимозаменяемости, из-за невозможности теоретической градуировки.

Схема ротаметра представлена на рис.12.3.1.

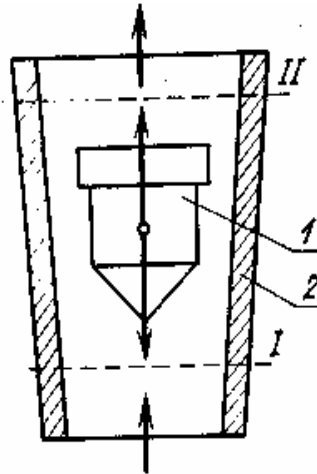


Рисунок 12.3.1- Схема ротаметра

Прибор работает в трубопроводах с восходящим потоком. Основными элементами ротаметра являются коническая стеклянная трубка 2 и поплавок 1. Под действием давления, создаваемого восходящим потоком измеряемой среды, происходит вертикальное перемещение поплавка в конической трубке, что вызывает (из-за конической формы трубки) изменение кольцевого зазора между поплавком и стенками трубки и соответственно площади проходного сечения прибора. Таким образом, в процессе работы прибора перепад давлений по обе стороны поплавка остается практически постоянным. При изменении расхода вещества поплавок в трубке перемещается до тех пор, пока его вес не уравновесится изменяющейся в связи с изменением проходного сечения силой динамического давления потока.

Уравнение равновесия поплавка.

$$V_{II} = (\rho_{II} - \rho)g = C_{II}\rho \frac{v^2}{2} f_{II} ; \quad (12.3.1)$$

откуда средняя скорость потока в кольцевом сечении

$$v = \sqrt{\frac{2V_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)g}{C_{\Pi}\rho f_{\Pi}}}; \quad (12.3.2)$$

где V_{Π} — объем поплавка; ρ_{Π} и ρ — плотность материала поплавка и среды; C_{Π} — коэффициент, который зависит от физических свойств среды, шероховатости, формы и геометрических размеров поплавка; f_{Π} — площадь наибольшего поперечного сечения поплавка.

Величина $\frac{1}{\sqrt{C_{\Pi}}} = a_p$ называют коэффициентом расхода ротаметров постоянного перепада давления.

Из уравнения объемного расхода и получим

$$Q = a_p (F_T - f_{\Pi}) \sqrt{\frac{2gV_{\Pi}(\rho_{\Pi} - \rho)}{\rho f_{\Pi}}}; \quad (12.3.3)$$

При малых центральных углах конической трубки (обычно $\delta = 35'$) между ходом поплавка и расходом вещества существует практически линейная зависимость, что является несомненным достоинством ротаметров постоянного перепада. Начальное значение расхода по шкале ротаметра составляет 15—20% от номинального. Измерение расхода вещества стеклянными ротаметрами производится с помощью шкалы, нанесенной непосредственно на поверхность трубки по положению верхней кромки поплавка.

Ротаметры (с металлической и стеклянной трубками) выпускаются на рабочее давление 0,6—32 МПа. Классы точности приборов — 1; 1,5; 2,5; 4.

Для передачи и регистрации информации ротаметры с металлической трубкой могут снабжаться специальными электрическими или пневматическими устройствами.

12.4 Расходомеры скоростного напора и счетчики

Расходомеры скоростного напора основаны на принципе определения расхода вещества по зависимости напора от скорости потока среды. Средняя скорость потока связана с объемным расходом вещества зависимостью

$$Q = v_{cp} \cdot F; \quad (12.4.1)$$

где F — площадь поперечного сечения потока

На схеме, представленной на рисунок 12.4.1, показан участок трубопровода, в котором измеряется давление в середине трубы и у стенки канала.

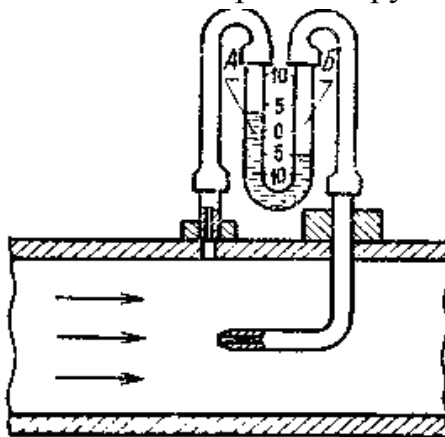


Рисунок 12.4.1- Измерение давления в середине трубы

Результаты этих измерений отличны друг от друга. В первом случае происходит измерение так называемого полного давления ρ_n , а во втором – статического ρ_c .

Исходя из уравнения Бернулли, разность между полным и статическим давлением:

$$\rho_n - \rho_c = \frac{v^2 \rho}{2},$$

$$\text{откуда } v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(\rho_n - \rho_c)} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \rho_v}; \quad (12.4.2)$$

где ρ — плотность измеряемой среды, кг/м^3 ; v — скорость движения измеряемой среды, м/с ; ρ_c — статическое давление, Па ; ρ_v — динамическое давление, Па ; ρ_n — полное давление, Па .

Для измерения динамического давления используются скоростные трубки и в качестве вторичных приборов — дифференциальные манометры. Процесс измерения проводится по следующей схеме (рисунок 12.4.1). С помощью трубки *A* измеряется статическое давление, трубки *B* — полное. Дифференциальный манометр, соединяющий обе трубки, дает возможность определить разность между полным и статическим давлением, т. е. динамическое давление.

Определив разность уровней рабочей жидкости в дифманометре, можно рассчитать динамическое давление.

$$\rho_v = \rho_n - \rho_c = hg(\rho_1 - \rho); \quad (12.4.3)$$

где ρ_1 — плотность рабочей жидкости в дифманометре, кг/м^3 ; ρ — плотность среды, кг/м^3 .

Подставляя полученное выражение, получим:

$$v = \sqrt{2hg\left(\frac{\rho_1}{\rho} - 1\right)}; \quad (12.4.4)$$

Наиболее простой способ определения скорости потока среды в круглых трубках при ламинарном и турбулентном движении среды основан на зависимости $v_{cp}/v_{max}=f(Re)_t$, где v_{cp} и v_{max} —средняя и максимальная скорости потока среды.

Число Рейнольдса Re определяется по формуле:

$$Re = 0.001 \frac{v \cdot D}{\nu} = 0.001 \frac{v D \rho}{\mu}; \quad (12.4.5)$$

где D — внутренний диаметр трубопровода, мм; ν — кинематическая вязкость среды m^2/c ; μ — динамическая вязкость среды, Па·с.

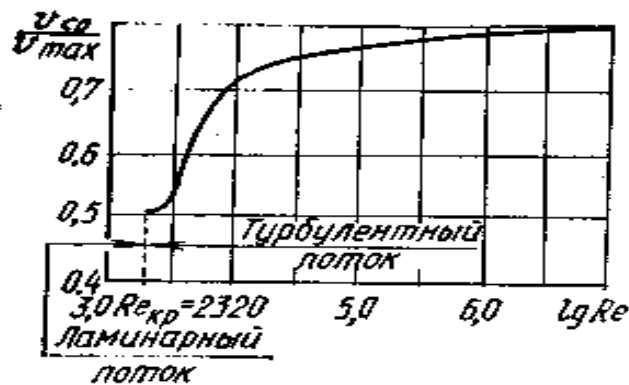


Рисунок 12.4.2 – Зависимость средней и максимальной скорости от числа Рейнольдса

Измерив ν и рассчитав Re , можно с помощью зависимости, представленной на рисунок 12.4.2, определить v_{cp} .

В трубопроводах круглого сечения при турбулентном движении среды средняя скорость может измеряться (с некоторыми допущениями) с помощью напорной трубки, устанавливаемой на расстоянии $0,12D$ от внутренней стенки трубы.

12.5 Электромагнитные расходомеры

Принцип действия расходомеров данного типа основан на том, что при протекании по трубопроводу электропроводящей жидкости в ней под действием внешнего магнитного поля индуцируется эдс, значение которой позволяет оценивать расход протекающей по трубопроводу среды.

Схема электромагнитного расходомера показана на рисунке 12.5.1. Труба 1 трубопровода из немагнитного материала помещается между полюсами постоянного магнита 2 перпендикулярно силовым линиям магнитного поля.

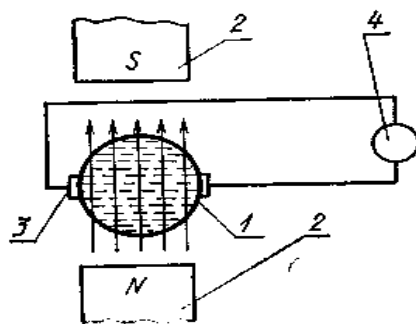


Рисунок 12.5.1- Схема электромагнитного расходомера

При проникании по трубопроводу электрической жидкости ионы под действием постоянного магнитного поля перемещаются к измерительным электродам, создавая эдс, пропорциональную скорости протекания жидкости.

Определение эдс осуществляется по основному уравнению электромагнитной индукции:

$$E = B \cdot l \cdot v_{cp}; \quad (12.5.1)$$

где B — магнитная индукция в зазоре между полюсами магнита, Вб; l — расстояние между электродами, м; v_{cp} — средняя скорость истечения жидкости, м/с.

Расход вещества определяется по формуле $Q = FE/(Bl)$. К основным преимуществам электромагнитных расходомеров следует отнести их практически без инерционность, что позволяет использовать приборы при регистрации быстропротекающих процессов и в системах автоматического регулирования. На результат измерения не влияет наличие взвешенных частиц и жидкости и пузырьков воздуха в газе. Показания прибора не зависят от физических свойств протекающих по трубопроводу веществ (плотности, вязкости) и от характера течения потока (ламинарный, турбулентный). Подбор необходимых материалов обеспечивает возможность измерения расхода при протекании химически активных и абразивных сред. Так как между расходом вещества и индуцируемой эдс существует линейная зависимость, градуировка шкалы вторичного прибора равномерна.

Основным недостатком электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем является образование на электродах гальванической эдс и эдс поляризации, что существенно влияет на результаты измерения.

Значительно меньше сказываются указанные недостатки в приборах с электромагнитами, питаемыми током переменной частоты, причем ослабление эффекта поляризации достигается увеличением частоты переменного магнитного поля.

На точность измерений с помощью электромагнитных расходомеров, питаемых током переменной частоты, влияют электрические помехи, возникаю-

щие от паразитных наводок внешних цепей, емкостных и индукционных помех от переменного тока питания и магнитных полей преобразователя. Частично эти помехи устраняются при экранировании прибора.

Электромагнитные расходомеры имеют класс точности 1,5 или 2,5 и измеряют в широком диапазоне (от $3 \cdot 10^{-9}$ до $3 \text{ м}^3/\text{с}$) расход жидкостей и газов с удельной электропроводностью от 10^{-3} до 10 См/м , температурой до 150°C и линейной скоростью движения среды от 0,6 до 10 м/с .

12.6 Ультразвуковые расходомеры

Принципиальная схема ультразвукового расходомера представлена на рисунке 12.6.1. На поверхности трубопровода расположены два пьезокерамических элемента 2 и 4. Пьезоэлемент 2 подключен к генератору 1 высокочастотных синусоидальных электрических колебаний. Пьезоэлемент 4 воспринимает ультразвуковые колебания и преобразует их в выходной электрический сигнал. Электрические колебания поступают на усилитель 3

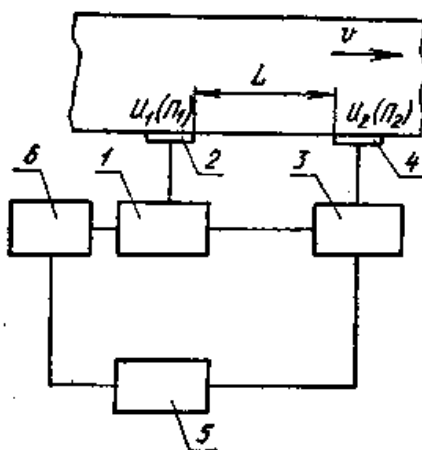


Рисунок 12.6.1- Принципиальная схема ультразвукового расходомера

и затем подаются на фазометр 5. Генератор 1 подключен ко второму усилителю 6, от которого колебания также поступают на фазометр. В первом случае направление излучения совпадает с направлением течения жидкости, во втором — обратно ему; поэтому продолжительность распространения ультразвуковой волны различна и определяется из следующих выражений:

$$\tau_1 = \frac{L}{C+v}; \quad (12.6.1)$$

$$\tau_2 = \frac{L}{C-v}; \quad (12.6.2)$$

где τ_1 и τ_2 - время прохождения ультразвукового сигнала вдоль и против течения жидкости; L — расстояние между источником и приемником ультразву-

ковых колебаний; C — скорость распространения колебаний; v — скорость течения жидкости.

Измеряемая разность продолжительности распространения излучения

$$\tau_2 - \tau_1 = \Delta\tau = \frac{2Lv}{C^2 \left(1 - \frac{v^2}{C^2}\right)}; \quad (12.6.3)$$

$$v = \frac{\Delta\tau C^2}{2L}; \quad (12.6.4)$$

$$Q = \varphi \frac{\Delta\tau C^2}{2L} F; \quad (12.6.5)$$

где F — площадь сечения потока; φ — коэффициент, учитывающий распределение скоростей в потоке. В настоящее время наиболее широко используются следующие методы ультразвукового измерения расхода вещества.

Метод, основанный на измерении разности фаз ультразвуковых колебаний, направленных вдоль и поперек на направления движения потока протекающей по трубопроводу жидкости. Использующие этот метод приборы называются фазовыми расходомерами. Метод, основанный на измерении разности частот повторения коротких импульсов ультразвуковых колебаний, направленных по и против направления потока. Приборы, построенные по этому методу, называются частотными расходомерами. К достоинствам ультразвуковых расходомеров относятся: высокая надежность первичных измерительных преобразователей — источников и приемников ультразвуковых колебаний; отсутствие выступов на внутренней поверхности трубопровода, нарушающих нормальный режим истечения вещества; быстрое действие, позволяющее измерять расход пульсирующих потоков при частоте пульсации до 10 кГц; принципиальная возможность измерения расхода любых (электропроводных и неэлектропроводных) сред.

Недостатками приборов этого типа являются: а) невысокая точность измерения; погрешность измерения достигает 2—5% и зависит от изменения физических свойств среды, температуры, появления многократного отражения ультразвуковой волны и т. д.; б) сложность измерительной аппаратуры и влияние ультразвуковых колебаний на физико-химические свойства некоторых промышленных жидкостей и газов.

Диапазон измерения расхода данными приборами теоретически неограничен. Применяются ультразвуковые расходомеры преимущественно при измерении расхода жидких сред, так как коэффициент поглощения звука у жидкостей значительно меньше по сравнению с веществами, находящимися в газообразном состоянии.

12.7 Массовые расходомеры

Массовый расход вещества определяется одним из двух способов: а) при помощи объемного расходомера, оборудованного устройствами для измерения плотности измеряемой среды и последующего пересчета объемного расхода в массовый; б) расходомерами, непосредственно измеряющими массовый расход вещества.

Массовые расходомеры выполняются инерционными и тепловыми.

В инерционных расходомерах потоку измеряемого вещества сообщается дополнительное движение, что создает в потоке инерционные эффекты, по которым судят о расходе. В зависимости от устройства, сообщаемого дополнительное движение потоку, на чувствительный элемент прибора могут действовать сила Кориолиса, гироскопический или инерционный момент.

Тепловые массовые расходомеры определяют расход либо по разности температур до и после нагрева вещества нагревательным элементом, помещенным в поток (калориметрические расходомеры), либо по количеству теплоты, теряемой нагретым телом, находящимся в измеряемом потоке (термоанемометры).

Принципиальная схема массового расходомера показана на рисунке 12.7.1 Поток измеряемого вещества принудительно закручивается турбинкой 2, которая вращается с постоянной угловой скоростью двигателем 1, создавая в потоке инерционный момент, пропорциональный массовому расходу

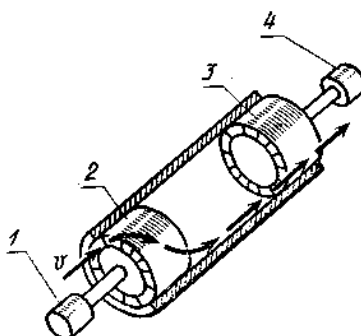


Рисунок 12.7.1- Принципиальная схема массового расходомера

вещества Q_M . Закрученный поток проходит через ведомую турбину 3, жестко связанную с упругим элементом 4 и поворачивает ее на угол φ .

Поворот турбинки на угол φ , пропорциональный массовому расходу потока, преобразуется в соответствующий электрический сигнал в форме, удобной для передачи и регистрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. М.: Мир, 1980.
2. Аксельрод З.М. Теория и проектирование приборов времени.
3. Аксельрод З.М. Проектирование часов и часовых систем. Машиностроение, 1981.
4. Исаев А.П. Приборы точного измерения времени и частоты: уч. пособие.- Л.: СРГВ 1985/
5. Тарасов С.В. Приборы времени. М., Машиностроение, 1976.
6. Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. Для студ. Вузов по спец. «Автоматизация технологических процессов и производств». –М.: Высшая школа, 1989.
7. Боднер В.А., Алферов В.А. Измерительные приборы: Учебник для вузов: В 2т. Том 1. Теория измерительных приборов. Методы измерения, устройство и проектирование приборов.- М.: Издательство стандартов, 1986.
8. Информационная техника и технология: Учеб. Для вузов/ В.И. Калашников, С.В. Нефедор, А.Б. Путилин и др.;под.ред. Г.Г.Раннева.-М.: ВШш.шк., 2002.
9. Приборы и системы для измерения вибраций, шума и удара: Справочник. В2-х кн./под ред. В.В.Клюева. -М.: машиностроение, 1978.
10. Измерение параметров вибраций и удара. Учебное пособие для ВИСМ/ В.С.Шкаликов, В.С. Пеллинец, Е.Г. Исакович, Н.Я.Цыган.- М.: Металлургия, 1990.
11. Измерения в промышленности. Справ. Изд. В 3-х Кн: Пер. с нем/Под ред. Прософа П.-2-е изд., прераб. И доп.- М.: Металлургия, 1990.
12. Богданов Ю.М. Приборы точной механики.- М.: Машиностроение, 1960.