

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ
(ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Е.В. Братковский, С.В. Казаков, А.Н. Шаповалов, А.В. Заводяный

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

Лабораторный практикум

Оренбург 2006

УДК 621.2

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент Сеничкин Б.К.
кандидат технических наук, доцент Пасюта И.И.

Братковский Е.В., Казаков С.В., Шаповалов А.Н., Заводя-
ный А.В.

Технологические измерения и приборы. Лабораторный практи-
кум. Предназначен для студентов специальностей 150101
«Металлургия черных металлов», 150106 «Обработка метал-
лов давлением», 140104 «Промышленная теплоэнергетика». –
Новотроицк: НФ ГОУ ВПО «МИСиС», 2006. – 100 с.

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в
области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по специальностям: «Металлургия чер-
ных металлов», «Обработка металлов давлением».

© Оренбургский государ-
ственный университет, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа 1. Изучение принципа действия и работы переносного потенциометра	7
Лабораторная работа 2. Устройство и принцип действия магнитоэлектрического гальванометра	19
Лабораторная работа 3. Термоэлектрические термометры	30
Лабораторная работа 4. Измерение температуры электрическими термометрами сопротивления	40
Лабораторная работа 5. Измерение температуры оптическим пирометром	51
Лабораторная работа 6. Градуировка тензометрических весов	61
Лабораторная работа 7. Измерение расхода газа различными методами	66
Лабораторная работа 8. Измерение уровня	78
Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ	84
Список рекомендуемой литературы	85
Приложения	86
Таблица П1 – Единицы измерения физических величин по Международной системе единиц (СИ)	87
Таблица П2 – Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов	92
Таблица П3 – Доверительные вероятности Р для доверительного интервала	93
Таблица П4 – Градуировочные характеристики различных термопар	94
Таблица П5 – Номинальные статистические характеристики термоэлектрических преобразователей	96
Таблица П6 – Пределы допустимых основных погрешностей термоэлектрических термометров при температуре свободных концов 0 °С	97
Таблица П7 – Основные технические характеристики стандартных удлиняющих термоэлектрических проводов	98

Введение

Основные понятия метрологии

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерение – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Истинное значение физической величины – значение, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта.

Действительное значение физической величины – значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Сигнал измерительной информации – сигнал, функционально связанный с измеряемой физической величиной.

Цена деления шкалы – разность значений, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Диапазон показаний – область, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

Коэффициент преобразования измерительного преобразователя – отношение сигнала на выходе измерительного преобразователя, отображающего измеряемую величину, к вызывающему его сигналу на входе преобразователя.

Чувствительность измерительного прибора – отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Абсолютная погрешность измерительного прибора – разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины.

Относительная погрешность измерительного прибора – отношение абсолютной погрешности прибора к действительному значению измеряемой величины (допускается абсолютную погрешность относить к показаниям прибора).

Приведенная погрешность измерительного прибора – отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению. Обычно за нормирующее значение принимают диапазон показаний. Приведенная погрешность выражается в процентах.

Систематическая погрешность средств измерений – составляющая погрешности, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся.

Случайная погрешность средства измерения – составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом.

Основная погрешность средства измерений – погрешность средства измерения, используемого в нормальных условиях.

Предел допускаемой погрешности средства измерений – наи-

большая (без учета знака) погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению.

Класс точности средства измерения – обобщенная характеристика средства измерений, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей (изменением показаний для измерительных приборов), а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах.

Погрешности измерений аналогично рассмотренным выше погрешностям средств измерений подразделяются на абсолютные, относительные, систематические, случайные и грубые.

Погрешность метода измерений – составляющая погрешности измерения, вызванная несовершенством метода.

Поправка – значение величины, одноименной с измеряемой, прибавляемое к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности.

Различают следующие методы измерений: прямые, косвенные, совокупные и совместимые.

При *прямых измерениях* значение считывается непосредственно с отсчетного устройства средства измерения.

Косвенным измерением называется измерение, при котором искоемое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами x_i , подвергаемыми прямым измерениям

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

Если величины x_i независимы, то зависимость погрешности δ_y от погрешностей исходных величин δ_{x_i} выражается формулой

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i \right)^2}.$$

Выражение для погрешности сохраняет свой вид независимо от того, является ли δ_{x_i} средней квадратической или предельной погрешностью, только результат будет представлять соответственно среднюю квадратическую или предельную погрешность.

Совокупные измерения предполагают измерение нескольких однородных величин в различных сочетаниях, значения которых определяют путем решения системы уравнений.

К *совместным измерениям* относят одновременные измерения нескольких неоднородных величин для установления зависимости между ними.

Общие указания по выполнению работ

Лица, впервые приступившие к работе в лаборатории, должны получить инструктаж по технике безопасности. В каждой лаборатории существуют, помимо общих, свои специфические особенности, способные привести к травмам и другим несчастным случаям. Особое внимание должно быть обращено на места возможного поражения электрическим током, на аппаратуру и линии, работающие под большим давлением, на устройства со ртутью и правила их безопасного использования и на другие специфические опасные устройства.

Следует подробно изучить лабораторный стенд, на котором предстоит провести работы, используемую на нем аппаратуру и порядок выполнения работ. Включение оборудования может производить только преподаватель или учебный мастер.

Перед началом проведения опыта следует подобрать или подготовить бланки необходимых протоколов. Черновые результаты наблюдений предъявляются преподавателю для просмотра. В случае явного несоответствия результатов отдельных опытов необходимо выявить причины несоответствия и их повторно провести.

После окончания опытов на стенде вся аппаратура выключается и приводится в первоначальное состояние.

В отчет по работе включаются: теоретическое введение; схемы, эскизы и краткое описание стенда; перечень и характеристика проведенных опытов, результаты измерений в форме протоколов, графиков или расчетов.

Отчет подписывается всеми исполнителями работы с указанием даты выполнения и утверждается преподавателем. При утверждении отчета задаются вопросы, имеющие целью установить, что все исполнители хорошо представляютверяемое устройство, контрольную и вспомогательную аппаратуру, а также порядок выполнения работы и могут критически оценить полученные результаты.

Лабораторная работа 1. Изучение принципа действия и работы переносного потенциометра

1 Цель работы

Изучить принцип действия переносного потенциометра постоянного тока ПП-63. Изучить методику градуировки автоматических потенциометров (типа КСП-4). Изучить методику определения ЭДС при помощи потенциометра ПП-63.

2 Теоретическое введение

Компенсационный метод, основанный на уравнивании неизвестного сигнала ТТ известным напряжением, позволяет измерить т.э.д.с. довольно точно, так как в момент измерения ток в цепи термоэлектрического термометра равен нулю. Поэтому исключается погрешность, связанная с влиянием температуры окружающей среды на сопротивление внешней цепи. Приборы, использующие данный принцип, получили название потенциометров и делятся на две группы: неавтоматические (переносные и лабораторные) и автоматические.

Неавтоматические потенциометры. В переносных и лабораторных потенциометрах компенсация сигнала т.э.д.с. производится оператором вручную. Данные устройства нашли широкое распространение и обеспечивают более высокую точность измерения, чем автоматические.

На рисунке 1.1 приведена принципиальная схема потенциометра, который состоит из трех контуров: измерительного I, нормального элемента II и термопары III. Схема включает: источник питания Б, нормальный элемент НЭ, нуль-прибор НП, (миллиамперметр с нулем посередине шкалы), переключатель П, одно постоянное $R_{н.э}$ и два переменных сопротивления: батареи R_6 и реохорда R_p . Цель НЭ состоит в стандартизации величины компенсирующего (рабочего тока) I_p батареи Б. Необходимое изменение данной величины производится с помощью сопротивления R_6 . Переключатель П обеспечивает включение НП либо в контур нормального элемента, либо в контур термопары.

Стандартизация значения рабочего тока производится с помощью сопротивления R_6 после перевода выключателя П в положение К (контроль). Если падение напряжения U_{ab} на участке ab ($R_{н.э}$) не равно напряжению $E_{н.э}$, развиваемому нормальным элементом, то в контуре II появится ток и стрелка НП отклонится от нулевого положения. В этом случае перемещением движка сопротивления R_6 добиваются такого изменения тока, чтобы выполнялось равенство $E_{н.э} = U_{ab}$. При этом ток в цепи нормального элемента станет равным нулю.

Так как $U_{ab} = I_p R_{н.э}$, то на основании предыдущего равенства

$$I_p = E_{н.э} / R_{н.э} = \text{const} . \quad (1.1)$$

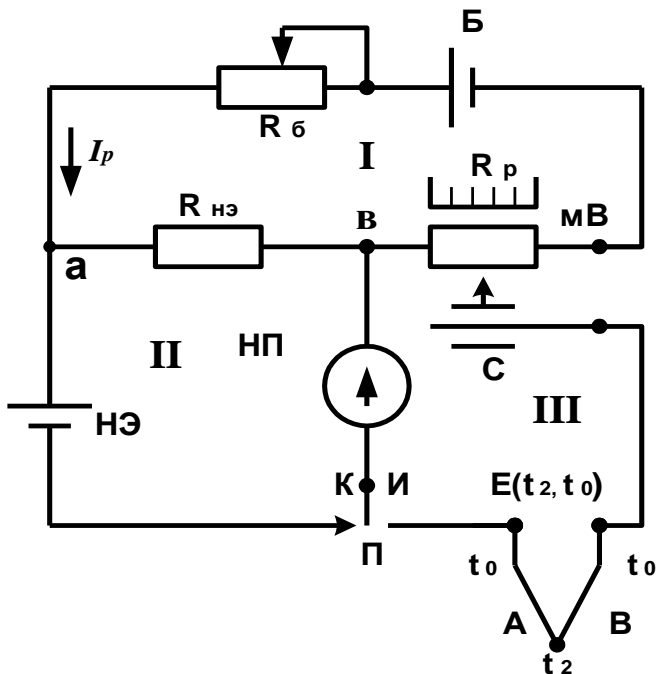


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема неавтоматического потенциометра

После достижения стандартизации рабочего тока I_p переключатель Π переводят в положение И (измерение), при этом НП включается в контур термопары. Если т.э.д.с. $E(t_2, t_0) \neq U_{bc}$ (падению напряжения на участке bc), то, перемещая движок реохорда R_p , обеспечивают возвращение НП к нулевому значению. При этом наступает полная компенсация неизвестного значения т.э.д.с. известным потенциалом $U_{bc} = I_p n R_p$, где n - относительная величина участка bc реохорда.

Можно записать $E(t_2, t_0) = U_{bc} = I_p n R_p$, и на основании уравнения (1.1) получим

$$E(t_2, t_0) = (E_{нэ} / R_{нэ}) n R_p = k n R_p, \quad (1.2)$$

где $k = \text{const}$.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что величина т.э.д.с. прямо пропорциональна сопротивлению участка bc реохорда R_p , что позволяет отградуировать шкалу, относительно которой перемещается движок C , в единицах напряжения (мВ).

Однако данная линейная зависимость выполняется лишь при условии соблюдения постоянства сопротивления измерительного контура 1 и

величины рабочего тока I . Первое условие обеспечивается изготовлением резисторов из марганитовой проволоки, а второе – периодической установкой величины тока, что вызвано изменением напряжения батареи питания.

Высокая точность измерения достигается за счет использования для стандартизации рабочего тока специальных нормальных элементов, которые характеризуются весьма высокой стабильностью, развиваемой э.д.с. Так для НЭ класса точности 0,02 ($E_{НЭ}=1018,90\pm 0,04$ мВ) допустимое изменение э.д.с. за год составляет 0,20 мВ. Следовательно, после пяти лет работы изменение характеристики составит не более 1 мВ (0,1%).

Основные преимущества компенсационного метода измерения т.э.д.с.:

1. отсутствие тока в цепи термометра в момент измерения;
2. исключение операции измерения величины тока – НП является лишь индикатором его отсутствия.

Неавтоматические потенциометры изготавливаются различного класса точности – от 0,2 до 0,0005. Для проведения измерений в цеховых условиях обычно используются переносные потенциометры классов точности 0,02; 0,05; 0,1 и 0,2.

Автоматические потенциометры. Автоматические потенциометры исключают участие человека в проведении операции компенсации входного сигнала и поэтому нашли широкое распространение для измерения, сигнализации и автоматического регулирования температуры в металлургических агрегатах.

На рисунке 1.2 приведена упрощенная схема устройства автоматического потенциометра.

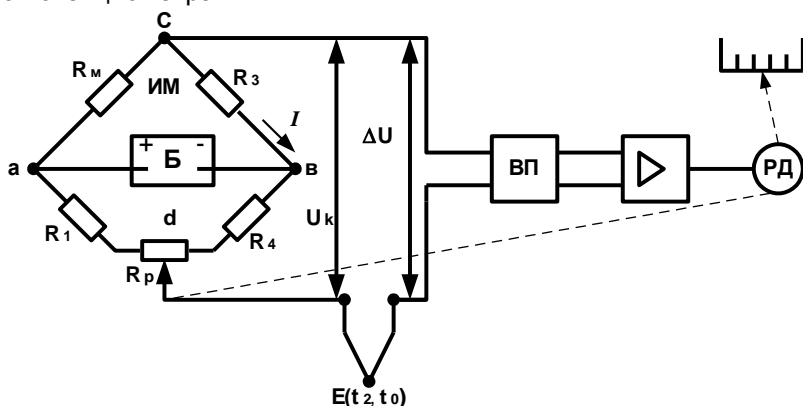


Рисунок 1.2 – Упрощенная принципиальная схема автоматического потенциометра

Сигнал ТТ ($E(t_2, t_0)$) сравнивается с компенсирующим напряжением U_k , снимаемым с диагонали неуравновешенного измерительного моста ИМ (Б – источник питания). Мостовая измерительная схема является более

совершенной и позволяет непрерывно вводить коррекцию на изменяющуюся температуру свободных концов термоэлектрического термометра.

Если $E(t_2, t_0) \neq U_K$, то на вход вибропреобразователя ВП подается сигнал дисбаланса ΔU . Происходит преобразование напряжения тока в электрический сигнал переменного тока, который затем усиливается в усилителе и подается на реверсивный двигатель РД. Последний одновременно перемещает движок реохорда R_p и стрелку относительно шкалы прибора. Изменение положения движка R_p приводит к такому изменению U_K , которое влечет за собой уравнивание измеряемой т.э.д.с. компенсирующим напряжением. При $\Delta U = 0$ двигатель остановится. Таким образом, любые изменения т.э.д.с. приводят к перемещению РД, т.е. прибор непрерывно автоматически компенсирует измеряемый сигнал известным напряжением.

Автоматические потенциометры выпускаются различных модификаций: показывающие, самопишущие (ленточная или круглая диаграмма); одно- и многоточечные (2, 3, 6, 12 каналов); миниатюрные, малогабаритные, нормальных размеров; регулирующие, с выходными устройствами дистанционной передачи показаний; с различным временем пробега стрелкой всей шкалы. Класс точности серийных автоматических приборов 0,25; 0,5 и 1,0. Градуировка выполняется либо в градусах Цельсия с одновременным указанием типа градуировки ТТ, либо в милливольтках. Принципиальная типовая схема одноточечного потенциометра представлена на рисунке 1.3.

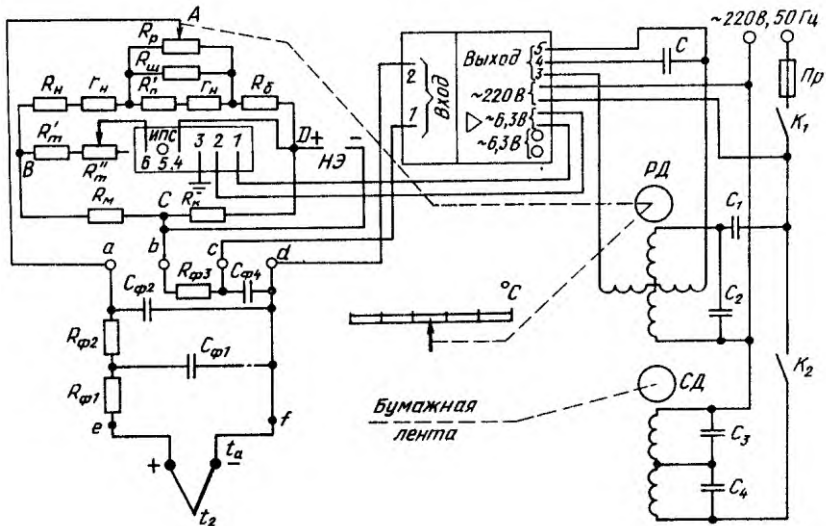


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема одноточечного автоматического потенциометра

Измерительный мост включает: R_p – реохорд; $R_{ш}$ – шунт, предназначенный для подгонки сопротивления реохорда; $(R_n + r_n)$ – сопротивления, определяющие нижний предел шкалы; $(R_n + r_n)$ – сопротивления, опре-

деляющие верхний предел измерения; R_6 – балластное сопротивление, обеспечивающее получение рабочего тока $I_1 = 3$ мА; R_k – контрольное сопротивление (509,5 Ом), служащее для контроля величины рабочего тока $I_2 = 3$ мА при градуировке или поверке прибора; R_m – медное сопротивление для компенсации изменения температуры свободных концов ТТ. Питание моста производится с помощью источника стабилизированного напряжения ИСП, развивающего ток 5 мА при напряжении 5 В. Сопротивления R'_m и R''_m обеспечивают получение рабочего тока стандартных параметров. Для периодической (через 2500 ч работы) поверки предназначены контакты НЭ, к которым подключается образцовый потенциометр, либо насыщенный нормальный элемент и нульгальванометр.

Сопротивление $R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$, $R_{\phi 3}$ и конденсаторы $C_{\phi 1}$, $C_{\phi 2}$, $C_{\phi 3}$ образуют фильтры, устраняющие продольные и поперечные помехи, возникающие в цепях ТТ под действием внешних электромагнитных помех.

Последовательно с термопарой через вибропреобразователь ВП включен усилитель. К выходным клеммам усилителя подключена одна из обмоток (управляющая) возбуждения реверсивного двигателя РД, вторая обмотка питается от сети. Конденсаторы C_1 и C_2 обеспечивают получение сдвига фаз (90°) между магнитными потоками обмотки возбуждения и управляющей обмотки, причем последняя шунтируется конденсатором C_3 , компенсирующим индуктивную составляющую тока в данной обмотке.

Для перемещения диаграммной ленты, на которой осуществляется запись измеряемой величины, установлен синхронный двигатель СД, его включение производится тумблером K_2 .

Реохорд выполнен из сплава палладий-вольфрам, имеющего высокую абразивную стойкость, контакты движка – из сплава золото-серебромедь. Все остальные сопротивления измерительного моста изготовлены из манганитовой проволоки.

Медное сопротивление R_m находится в одинаковых температурных условиях со свободными концами ТТ. При постоянной температуре рабочего спая t_2 повышение температуры t_2 приводит к уменьшению т.э.д.с. $E(t_2, t_0)$ на ΔE и увеличению R_m на ΔR_m . Сопротивление рассчитано таким образом, чтобы приращение падения напряжения на нем было точно равно уменьшению т.э.д.с. ТТ, т.е. $I_2 \Delta R_m = \Delta E$. Автоматическое введение поправки производится при изменении температуры свободных концов от 5 до 50 °С.

Напряжение U_{AC} , снимаемое с вершин А и С измерительного моста, зависит только от положения движка реохорда. Поэтому каждому значению т.э.д.с. ТТ $E(t_2, t_0)$ соответствует определенное (единственное) положение движка реохорда, при котором эти величины будут равны, и ток в цепи термометра будет отсутствовать. В случае $U_{AC} \neq E(t_2, t_0)$, появляется напряжение разбаланса измерительной схемы, которое является напряжением постоянного тока. Для усиления сигнала применяют усилители пере-

менного тока как более стабильные и надежные в работе. Преобразование сигнала разбаланса в переменное напряжение производится с помощью вибрационного переключателя на два положения (ВП).

Таким образом, при наличии в измерительной схеме сигнала разбаланса через первичную обмотку трансформатора проходит ток то в одном, то в другом направлении, индуктируя в его вторичной обмотке переменное напряжение (50 Гц), фаза которого в зависимости от знака поступающего сигнала либо совпадает с фазой напряжения питания, либо противоположна ей.

Трансформатор защищают от воздействия внешних магнитных полей специальными экранами. Резонансный конденсатор C_1 , включенный во вторичную обмотку трансформатора, исправляет форму колебаний тока, не являющегося строго синусоидальным.

Основное усиление входного сигнала разбаланса производится в полупроводниковом усилителе, содержащем: входное устройство, усилитель напряжения, усилитель мощности, силовой трансформатор, выпрямитель. Питание от сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В. Потребляемая мощность не превышает 12 ВА, выходная мощность – 1,5 ВА. Нагрузкой усилителя является обмотка управления реверсивного двигателя РД, перемещающего движок реохорда и стрелку прибора.

Порог чувствительности у серийных усилителей составляет 10 мкВ, а для приборов класса точности 0,25 и шкалой 0-1 мВ – 0-1 мкВ. На выходе усилителя устанавливается асинхронный двухфазный двигатель (РД) переменного тока с короткозамкнутым ротором в виде беличьей клетки. На одну обмотку подается напряжение от усилителя, а на другую – от сети. Для питания измерительной схемы автоматических потенциометров применяют источники питания стабилизированные (ИПС).

Проверка автоматических потенциометров заключается в сравнении с показаниями образцовых потенциометров, у которых допустимое значение основной погрешности (в мВ) в 4-5 раз меньше, чем у поверяемого прибора. Наиболее часто поверочная схема включает источник регулируемого напряжения ИРН, который обеспечивает подачу на входы поверяемого и образцового потенциометров одинакового плавно регулируемого напряжения. С помощью ИРН устанавливают указатель поверяемого прибора на заданную отметку шкалы, а затем измеряют данное напряжение образцовым прибором.

Основная допускаемая погрешность прибора определяется по формуле

$$\delta = \frac{(E - e - E_0) \cdot 100}{E_k - E_n}, \quad (1.3)$$

где E – т.э.д.с. термопары по градуировочной таблице, мВ; e – т.э.д.с. термопары по градуировочной таблице, соответствующая температуре свободных концов, мВ; E_0 – отсчет напряжения по образцовому потенциометру, мВ; E_k и E_n – т.э.д.с. термопары по градуировочной таблице, соответствующая конечной и начальной отметкам шкалы, мВ.

Погрешности показаний и записи автоматических потенциометров (и мостов) можно разделить на две группы: ошибки, возникающие в условиях нормальной эксплуатации, и ошибки, являющиеся следствием:

а. отклонения различных внешних факторов (температуры и влажности воздуха, напряжения и частоты тока питания, вибрации) от нормальных значений;

б. появления внешних переменных магнитных полей и других источников помех.

Вариации и погрешности в измерении и регистрации контролируемых величин при нормальных условиях работы приборов возникают вследствие:

а. неточной градуировки шкалы;

б. неточной установки шкалы и диаграммной бумаги;

в. наличия зоны нечувствительности и зазоров в следящей системе автоматической компенсации;

г. нестабильности внутренних электромагнитных полей и напряжения источника питания измерительной схемы;

д. ошибки отсчета показания.

Значительные дополнительные погрешности, часто превышающие допустимые значения, возникают из-за мощных электромагнитных полей, являющихся следствием работы мощных металлургических агрегатов (электродуговые печи, камерные и протяжные печи с электронагревателями сопротивления) или их вспомогательного оборудования (электродвигатели загрузочных кранов, привод роликов и т.п.). Также на точность записи влияет влажность окружающего воздуха.

3 Описание установки

На рисунке 1.4 представлена схема лабораторной установки, которая включает в себя следующие приборы: потенциометр постоянного тока ПП-63 класса точности 0,05, работающего в трех диапазонах измерений 0-25, 0-50, и 0-100 мВ, его питание осуществляется с помощью трех параллельно включенных гальванических элементов типа «Марс», обеспечивающих ЭДС 1,2-1,65 В; нормальный элемент (НЭ) имеет класс точности 0,02; автоматический потенциометр КСП-4; милливольтметр М-64; источник ЭДС.

Прибор ПП-63 подключается к электрической схеме с помощью проводов и разъема Щ – 1. Переключатель K_1 обеспечивает подключение ПП-63 к одному из трех приборов (М-64, КСП-4, источнику ЭДС). Переключатель K_3 изменяет диапазон шкалы КСП-4. При помощи переключателя K_2 изменяется напряжение источника ЭДС.

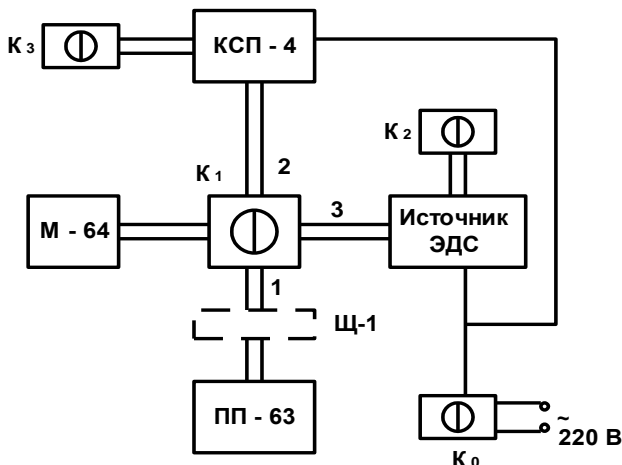


Рисунок 1.4 – Схема лабораторной установки

На рисунке 1.5 показан внешний вид панели управления автоматического потенциометра ПП-63.

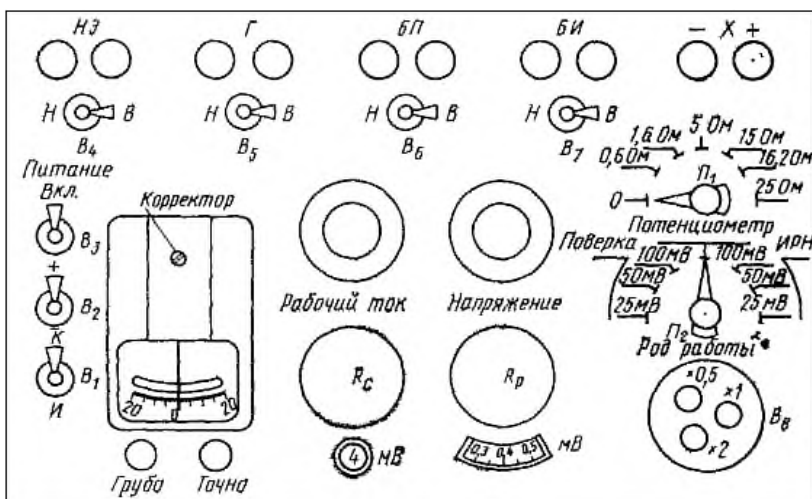


Рисунок 1.5 – Внешний вид панели управления автоматического потенциометра ПП-63.

4 Порядок выполнения работы

4.1. Включить стенд тумблером K_0 .

4.2. Подготовить ПП-63 к работе, которая заключается в установке рабочего тока и строго определённом положении некоторых тумблеров на лицевой панели прибора.

Тумблеры «В₄-В₇» и зажимы «НЭ», «БП», «Г» и «БИ» обеспечивают возможность работы ПП-63 как с внутренним («В»), так и с наружными («Н») гальванометром, источником питания «БП» и «БИ». В нашем случае их необходимо перевести в положение «В».

Включить питание тумблером «В₃». Поставить тумблер «В₁» в положение «К». Вращением ручки «рабочий ток», нажимая поочередно кнопки «грубо», «точно», установить рабочий ток. О верной его установке свидетельствует отсутствие тока в контуре. В этом положении стрелка «НП» не должна отклоняться от «0». После установки рабочего тока тумблер «В₁» переводится в положение «И». Далее до конца измерений ручку «рабочий ток» не трогать!

4.3. Выбрать из таблицы 1.1 вариант индивидуального задания в соответствии с номером.

Таблица 1.1 – Варианты заданий для поверки милливольтметра

№ Варианта	Температура по милливольтметру, °С						Положение переключателя	
	1	2	3	4	5	6	К ₂	К ₃
1	0	100	200	300	400	500	1	10
2	0	200	400	600	800	1000	2	9
3	0	250	500	750	1000	1100	3	8
4	0	50	100	150	200	250	4	7
5	100	200	300	400	500	600	5	6
6	200	400	600	800	1000	1100	6	5
7	0	20	40	60	80	100	7	4
8	0	60	100	120	140	160	8	3
9	500	540	580	620	700	750	9	2
10	600	60	660	700	72	760	10	1
11	100	250	400	550	700	850	11	11
12	200	280	360	440	520	600	10	1

4.4. Подключить ПП-63 к стенду: соединить с помощью проводов клеммы «Х» на потенциометре с разъёмом Щ-1 на стенде с учётом полярности.

4.5. Поверка милливольтметра М-64.

4.5.1. Поставить на стенде тумблер К₁ в положение «1».

На ПП-63: поставить тумблер П₁ в одно из положений (0,6; 1,6; 5; 15; 16,2; 25 Ом), определяющее сопротивление внешней цепи (в нашем случае им является внутреннее сопротивление милливольтметра М-64, равное 5 Ом).

4.5.2. При помощи переключателя П₂ задать нужный режим работы. Установить штепсельный переключатель В₈ в оптимальное положение. Для этого с помощью переключателя П₂ осуществляется выбор необходимого рода работы; он может устанавливаться в одно из 7 положений. Для повер-

ки милливольтметров со шкалой в °С переключатель переводится в одно из трёх левых положений «поверка»: 25, 50 или 100 мВ. Выбор одного из положений даёт возможность измерять напряжение в разных диапазонах, например от 0 до 50 мВ. Чем меньше диапазон измерений, тем большая точность измерения. Одновременно штепсельный переключатель V_8 устанавливается в положение «0,5», «1» или «2» в соответствии с P_2 . То есть при P_2 в положение 25 мВ, переключатель V_8 ставится в положение «0,5». При P_2 в положении «50 мВ», переключатель V_8 ставится в положение «1» и при P_2 положении «100 мВ» – в положение «2».

4.5.3. Поставить тумблер V_2 в положение «+».

4.5.4. С помощью рукоятки «напряжения» установить на М-64 поочередно температуры, соответствующие номеру варианта, градуировке термопары и т.э.д.с. и занести в таблицу 1.2.

4.5.5. При каждой выставленной температуре с помощью потенциометра ПП-63 определяется ЭДС, для чего нажимая и удерживая рукой кнопку «грубо» и перемещая рукоятки секционированного резистора R_C (шкала 0-48 мВ) со ступенями через 2 мВ и реохорда R_P (шкала 0-2 мВ), устанавливают стрелку гальванометра в непосредственной близости к «0».

Затем, нажимая и удерживая рукой кнопку «точно» и плавно вращая ручку реохорда R_P , добиваются полного совпадения стрелки с нулевой отметкой шкалы. Измеренное значение (сумма R_C и R_P) является истинным значением напряжения, умноженного на положение переключателя V_8 («0,5» «1» «2»). Данные измерений записываются в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты поверки М-64

№ опытов	Температура по М-64, °С	ЭДС по ПП-63	Температура по ПП-63, °С
1			
2			
3			
4			
5			
6			

4.5.6. Для полученных значений ЭДС на ПП-63 из табл. П5 определяется истинное значение температуры по показаниям термопары хромель-алюмель (ХА) и записываются в таблицу 1.2.

4.6. Градуировка шкалы КСП-4.

На стенде поставить: K_1 в положение «2», K_3 в положение согласно варианту из таблицы 1.1.

На ПП-63 установить: V_1 в положение «И», V_2 в положение «+», V_3 в положение «вкл.», P_1 в положение «0», P_2 в одно из положений, обеспечивающих включение ИРН (источник регулируемого напряжения), поставить V_8 в соответствие с P_2 (см. выше).

Вращением ручки «напряжение на ПП-63 выставить стрелку КСП-4 на начало шкалы. Переключить P_2 в одно из положений «поверка», соответствующее положение ИРН. Нажимая и удерживая кнопки «грубо», «точно» при помощи секционированного резистора R_C и реохорда R_P , установить стрелку гальванометра «НП» на «0». Повторить операции по градуировке шкалы КСП-4 для точек 25%, 50%, 75% и 100% шкалы КСП-4 в соответствии с вариантом.

Примечание: В случае зашкаливания гальванометра в одном из 2-х крайних положений или невозможности вывести стрелку на «0» при помощи R_C и R_P необходимо переключателем B_2 изменить полярность компенсирующего напряжения. Затем, нажимая и удерживая рукой кнопку «точно» и плавно вращая ручкой реохорда R_P , добиваются полного совпадения стрелки с нулевой отметкой шкалы, измеренное значение является истинным значением напряжения, выставленного ИРН, умноженным на коэффициент, определяемый положением штепсельного переключателя «2», «1», «0,5».

4.7. Измерение напряжения источника ЭДС.

На стенде поставить: K_1 в положение «3», K_2 в положение согласно варианту.

На ПП-63 –установить: B_1 в положение «И», B_2 в положение «-», B_3 в положение «вкл.», P_1 в положение «0», P_2 в положение «потенц.».

Выбор верхнего предела измерения термоэдс или напряжения производится с помощью штепсельного переключателя « B_8 »; положения «X 2», «X 1», «X 0,5» соответствуют 100, 50 и 25 мВ верхнего предела измерения.

При помощи секционированного резистора R_C и реохорда произвести замер ЭДС. Замеры повторяются 5 раз, используя только кнопку «грубо» (каждый раз после замера показания R_C и R_P сбрасываются до нуля).

Повторить замер, используя кнопки «грубо» и «точно».

5 Обработка результатов измерений

5.1. Поверка милливольтметра М-64.

Для полученных значений ЭДС потенциометра ПП-63, пользуясь данными для термопары хромель-алюмель, приведенным в табл. П4, определяется истинное значение температуры и заносятся в таблицы 1.2.

Строятся графики зависимости температуры, определённой по М-64, в зависимости от ЭДС, определённой по ПП-63.

Считая ПП-63 образцовым прибором, выявляется систематическая составляющая погрешность М-64 по разности их показаний.

5.2. Градуировка шкалы КСП-4.

Построить градуировочный график: по оси абсцисс – % по шкале КСП-4, по оси ординат – показания ПП-63 в мВ.

5.3. Измерение напряжения источника ЭДС и определить погрешность ПП-63.

Определить среднеарифметическое пяти замеров без использования кнопки «точно», его точечную и интервальную оценку, систематическую

и приведенную погрешность. Сделать заключение о близости к результату, полученному при использовании точной регулировки.

6 Требования к отчету

Отчёт должен содержать краткое теоретическое введение, схему и описание прибора ПП-63, схему лабораторной установки, результаты измерений, графики, результаты математической обработки.

7 Контрольные вопросы

1. Какой принцип измерения лежит в основе действия потенциометра?
2. Зачем нужен нормальный элемент?
3. В каких режимах может работать потенциометр ПП-63?
4. Что такое «градуировка шкалы»?
5. Зачем во время работы периодически контролируют рабочий ток?
6. Для чего нужны резисторы R_n , r_n , R_k , r_k , R_6 , R_c ?
7. Для чего служат емкости $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$?
8. Из каких контуров состоит потенциометр?
9. С какой целью установлен шунтирующий резистор $R_{ш}$?
10. Из каких контуров состоит неавтоматический потенциометр?
11. Какие преимущества имеет компенсационный метод измерения ЭДС?
12. Как учитывается изменение температуры свободных концов термопары при работе автоматического потенциометра?

Лабораторная работа 2. Устройство и принцип действия магнитоэлектрического гальванометра

1 Цель работы

Изучить конструкцию и принцип действия магнитоэлектрического гальванометра. Освоить измерение напряжения и тока при помощи гальванометра. Освоить измерение термоэдс милливольтметром, а также методику определения предельной погрешности комплекта (термопара, удлинительные провода, милливольтметр).

2 Теоретическое введение

Т.э.д.с, развиваемая термоэлектрическим термометром, измеряют двумя методами: прямым и компенсационным, первый реализуют милливольтметры, а второй – потенциометры.

Принцип работы милливольтметра заключается в использовании взаимодействия магнитного поля неподвижного магнита и постоянного тока, протекающего через обмотку подвижной рамки. Рамка R_p включается в цепь ТТ (рисунок 2.1) с помощью компенсационных A_1B_1 и медных проводов C .

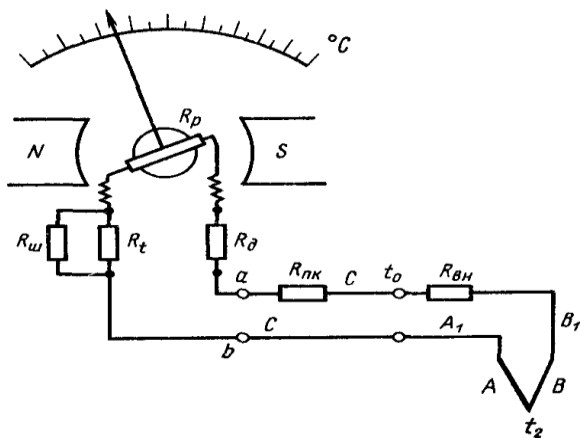


Рисунок 2.1 – Электрическая схема включения магнитоэлектрического милливольтметра в цепь термоэлектрического термометра

Сила тока, протекающего в цепи, зависит от величины т.э.д.с. $E_{AB}(t_2, t_0)$ и сопротивления измерительной цепи

$$I = \frac{E_{AB}(t_2, t_0)}{(R_T + R_{ВН})}, \quad (2.1)$$

где R_T – сопротивление милливольтметра, складывающееся из сопротивлений рамки R_p , добавочного R_d , шунта $R_{ш}$ и терморезистора R_t ; $R_{вн}$ – сопротивление внешней цепи, складывающееся из сопротивления терморпары R_T , сопротивления компенсационных $R_{кп}$ и соединительных R_c проводов, сопротивления подгоночной катушки $R_{пк}$, Ом.

При протекании тока через рамку, окруженную полем постоянного магнита, возникает магнитоэлектрический момент M (Н·м), поворачивающий рамку и равный

$$M=2rn \ell BI, \quad (2.2)$$

где $2r$ – ширина рамки, м; ℓ – длина рамки, м; n – число витков обмотки рамки; B – магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл; I – сила тока, протекающего в рамке, А.

При перемещении рамки одновременно закручиваются спиральные пружины, которые создают противодействующий упругий момент $M_{п}$ (Н·м)

$$M_{п} = W\varphi, \quad (2.3)$$

где W – удельный противодействующий момент (момент пружин, отнесенный к единице угла поворота рамки), Н·м/рад; φ – угол поворота рамки, рад.

Величина удельного противодействующего момента определяется материалом и размерами пружинок, или других видов подвески, например растяжек.

Вращение рамки будет продолжаться до тех пор, пока магнитоэлектрический момент не уравновесится противодействующим упругим моментом $M=M_{п}$ и $\varphi=2rn \ell BI/W$.

Принимая, что r , ℓ , n , B , W для данной конструкции прибора при нормальных условиях эксплуатации являются постоянными величинами, получим

$$\varphi = C_0 I, \quad (2.4)$$

где $C_0 = 2rn \ell BI/W$ – чувствительность измерительного механизма к току, рад/А.

Следовательно, чем больше ток, тем больше угол поворота рамки. Подставив в формулу (2.4) выражение для тока, получим

$$\varphi = \frac{C_0 E_{AB}(t_2, t_0)}{R_T + R_{вн}}. \quad (2.5)$$

В общем виде угол поворота зависит от ряда параметров (для данного типа ТТ)

$$\varphi = f(t_2, t_0, R_T, R_{ВН}) \quad (2.6)$$

Для получения однозначной зависимости угла поворота рамки, а следовательно, и положения стрелки относительно оцифрованной шкалы прибора необходимо градуировать милливольтметр при заданных величинах $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $R_{ВН} = 5; 15; 25 \text{ Ом}$. Подгоночная катушка $R_{П.К}$ предназначена для того, чтобы в реальных условиях эксплуатации (изменяющиеся и заранее неизвестные значения сопротивлений $R_T, R_{кп}, R_c$ довести общую величину $R_{ВН}$ до значения, при котором был градуирован прибор.

На точность показаний милливольтметра может оказывать влияние отклонение температуры окружающего воздуха от нормальной ($20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), так как это приводит к изменению сопротивления медной обмотки рамки (до 0,4% на $1 \text{ }^\circ\text{C}$). Для снижения указанной погрешности последовательно с рамкой включается значительное дополнительное манганиновое сопротивление $R_{ш}$ и терморезистор R_t , имеющий отрицательный температурный коэффициент сопротивления, которые образуют термокомпенсатор.

Напряжение на зажимах милливольтметра $U_{ab} = IR_T$.

Подставим в данное выражение значение тока из формулы (2.1) и получим

$$U_{ab} = \frac{E_{AB}(t_2, t_0)R_T}{R_t + R_{ВН}}.$$

После преобразования формула примет вид

$$U_{ab} = E_{AB}(t_2, t_0) - \frac{U_{ab}R_{ВН}}{R_T} = E_{AB}(t_2, t_0) - IR_{ВН}. \quad (2.7)$$

Следовательно, измеряемый милливольтметром сигнал отличается от т.э.д.с. развиваемой термопарой, на величину падения напряжения во внешней цепи, которое тем меньше, чем больше внутреннее сопротивление прибора. Это обстоятельство и определяет стремление увеличить данную характеристику измерительной системы.

Типы милливольтметров. Промышленность выпускает показывающие, самопишущие и регулирующие милливольтметры, имеющие класс точности 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5. Шкала градуируется либо в градусах Цельсия, либо в милливольттах. На циферблате указывается тип градуировки ТТ, класс точности, значение внутреннего и внешнего сопротивления милливольтметра. Приборы выпускаются для измерения температуры в одной или нескольких точках (до 12). Они могут иметь встроенное двух- или трехпозиционное регулирующее устройство, а в ряде случаев и аварийную сигнализацию превышения температуры по одному каналу.

Существуют различные конструктивные оформления измерительной части милливольтметра. Рамки выполняются как с вертикальной, так и горизонтальной осью вращения. Система подвески рамки на растяжках имеет высокую механическую прочность и исключает ошибки измерения, связанные с износом керновых подпятников. Расположение магнита внутри рамки обеспечивает получение неоднородного магнитного поля. Такие

приборы имеют преимущества перед милливольтметрами с внешним магнитным полем (меньше собственное поле рассеяния, а также влияние внешних магнитных полей). Данный механизм может быть использован в логометрах, работающих в комплекте с термометрами сопротивления.

Погрешности измерения т.э.д.с. милливольтметром. Измерительный комплект, включающий ТТ и милливольтметр (см. рисунок 2.1), характеризуется наличием не только основных погрешностей (класс точности прибора, отклонение градуировки ТТ от стандартной), но и возникновением в процессе эксплуатации следующих дополнительных погрешностей:

1. изменения сопротивления внешней цепи $R_{вн}$ в зависимости от непостоянной температуры в цехах и на поверхности металлургического оборудования, вдоль которых прокладываются соединительные провода;
2. изменения сопротивления прибора R_t , вследствие значительного изменения температуры помещения, в котором установлен прибор;
3. изменения температуры t_0 свободных концов ТТ;
4. изменения механических характеристик измерительного механизма (упругих характеристик пружин, моментов трения в керновых подпятниках и т.п.);
5. наличия внешних магнитных полей.

Снижение влияния сопротивления внешней цепи добиваются увеличением диаметра соединительных проводов, а также повышением доли сопротивления подгоночной катушки $R_{пк}$ (выполняется из манганиновой проволоки) в $R_{вн}$.

Для исключения влияния отклонения температуры t_0 свободных концов от градуировочной вместо термостатов широко применяются коробки КТ для автоматической компенсации изменения т.э.д.с. ТТ.

На рисунке 2.2 представлена схема включения устройства КТ в измерительную цепь, состоящую из милливольтметра М и термометра АВ.

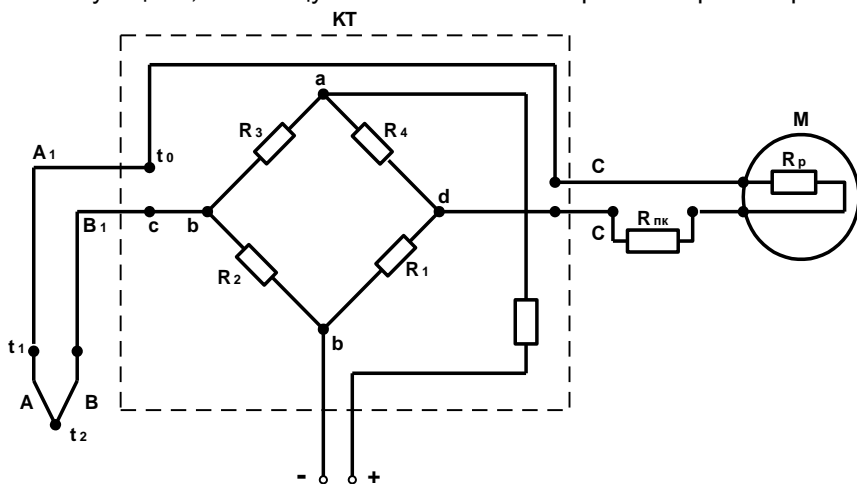


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема измерения т.э.д.с. с коробкой для автоматической компенсации температуры свободных концов ТТ

Компенсационные A_1B_1 и соединительные C провода присоединены к клеммам КТ. Таким образом, сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 , образующие равноплечий мост, имеют такую же температуру t_0 , которую имеют свободные концы. Сопротивления R_1, R_2 , и R_4 выполнены из манганина, R_3 – из меди. К вершинам диагонали ab подается постоянное напряжение, например от источника стабилизированного питания (на рисунке 2.2 не показан).

Сопротивления подобраны таким образом, что при $t = 0$ °С напряжение на вершинах c и d равно нулю, т.е. на милливольтметр поступает сигнал ТТ, соответствующий стандартной градуировке. При увеличении температуры t_1 ($t_1 > t_0$) возрастает сопротивление R_3 , что приводит к нарушению равновесия моста и появлению в точках c и d напряжения, компенсирующего уменьшения т.э.д.с. термометра, $E_{AB}(t_1, t_0) = U_{CD}$. Точность, с которой устройство КТ воспроизводит соответствующую термоэлектрическую характеристику при изменении температуры свободных концов до $t_1 = 50$ °С, составляет для ТТ типа ТПП, ТХА, ТХК ± 3 °С.

Проверка милливольтметров. Проверка приборов заключается в определении соответствия градуировочной характеристики и класса точности присвоенным значениям. Она приводится сравнением данных величин с показаниями лабораторных приборов, имеющих более высокий класс точности. На вход обоих приборов с помощью источника регулируемого напряжения (ИРН) одновременно подается одинаковый сигнал. Результаты измерений (мВ) сравниваются при прямом и обратном ходах и определяются погрешности поверяемого милливольтметра.

Гальванометрами называют высокочувствительные приборы, которые обычно имеют неградуированную шкалу; цену деления шкалы определяют экспериментально или по паспортным данным прибора. Гальванометры широко применяют для измерения малых токов, напряжений, количества электричества или отсутствия тока, напряжения в электрической цепи. Отсчетное приспособление у гальванометров может быть стрелочным или зеркальным. Стрелочные гальванометры удобны в эксплуатации, а зеркальные обладают более высокой чувствительностью. Чувствительность гальванометра зависит от способа установки подвижной части: она будет сравнительно не высокой, если подвижная часть установлена на кернах, средней – при установке ее на растяжках и высокой – при установке на подвесе. Диапазон измеряемых токов 10^{-11} – 10^{-5} А.

Гальванометры могут быть различных систем. Наиболее распространены гальванометры магнитоэлектрической системы с подвижной рамкой (рисунке 2.3).

Бескаркасная рамка 1 подвешена на упругой нити 2. Ток к рамке подается с двух сторон через подвес 2 и металлическую ленточку. Угол поворота рамки измеряется оптическим методом с помощью зеркальца объективным или субъективным способами. При объективном способе на зеркальце направляют узкий световой луч, который после отражения попадает на шкалу с миллиметровыми делениями в виде светового пятна. При субъективном способе отсчета перед зеркальцем помещают ярко освещенную шкалу. Наблюдатель через зрительную трубу видит отраженную в зеркаль-

це часть шкалы.

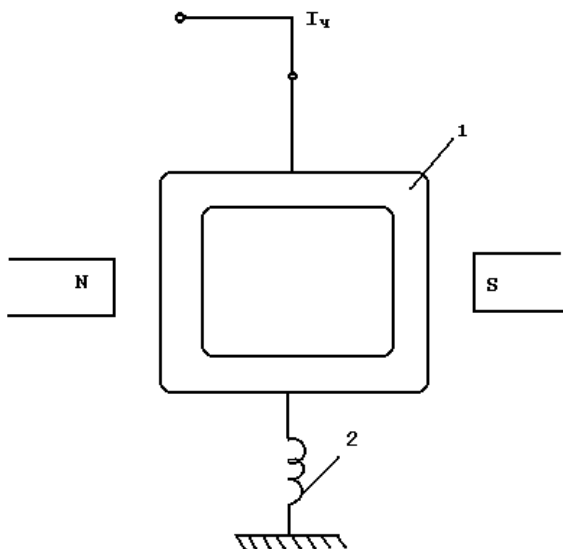


Рисунок 2.3 – Устройство магнитоэлектрического гальванометра

Тонкий провод обмотки рамки измерителя и спиральные пружинки нельзя нагружать токами более чем 20-50 мА. При измерении больших токов пользуются шунтами, которые включают параллельно измерительному механизму (рисунок 2.4). Сопротивление шунта $R_{ш}$ выбирают таким образом, чтобы большая часть измеряемого тока I протекала по шунту, а оставшаяся часть ($I_{из}$) не превышала допустимого для обмотки измерителя значения. Отношение токов $I / I_{из} = K$ называется коэффициентом шунтирования (коэффициент выбирается равным 2,5 или 10). Шунты обычно изготовляют из манганина – сплава с малым температурным коэффициентом сопротивления.

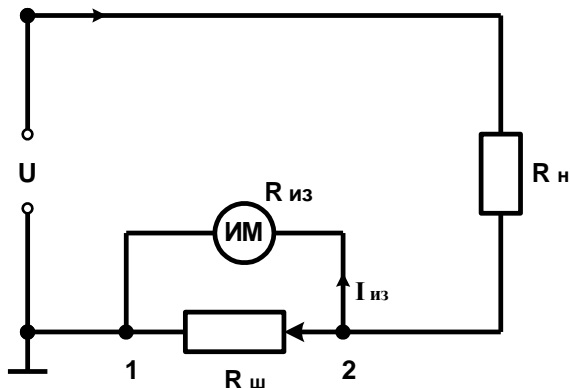


Рисунок 2.4 – Схема измерения тока

Непосредственное включение магнитоэлектрического механизма между двумя точками с разными электрическими потенциалами применяется только при незначительной разности потенциалов, исчисляемой мВ. В этом случае измерения проводят с помощью стрелочных милливольтметров или гальванометров. При измерении больших напряжений ток (I_V) следует ограничивать добавочным сопротивлением (R_D). Если предел измерения ($U_{из}$) необходимо расширить в m раз ($U = m U_{из}$). То величину добавочного сопротивления определяют следующим образом

$$I_V = \frac{U_{из}}{R_{из}} = \frac{m \cdot U_{из}}{R_{из} + R_D} = \frac{U}{R_V}, \quad (2.8)$$

где R_V – полное сопротивление вольтметра

$$R_D = (m - 1)R_{из}. \quad (2.9)$$

Вольтметр с добавочным сопротивлением малочувствителен к изменению температуры окружающей среды, т.к. обычно $R_{из} \ll R_D$.

3 Описание установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.5 и включает исследуемый гальванометр, амперметр, вольтметр, переключатели.

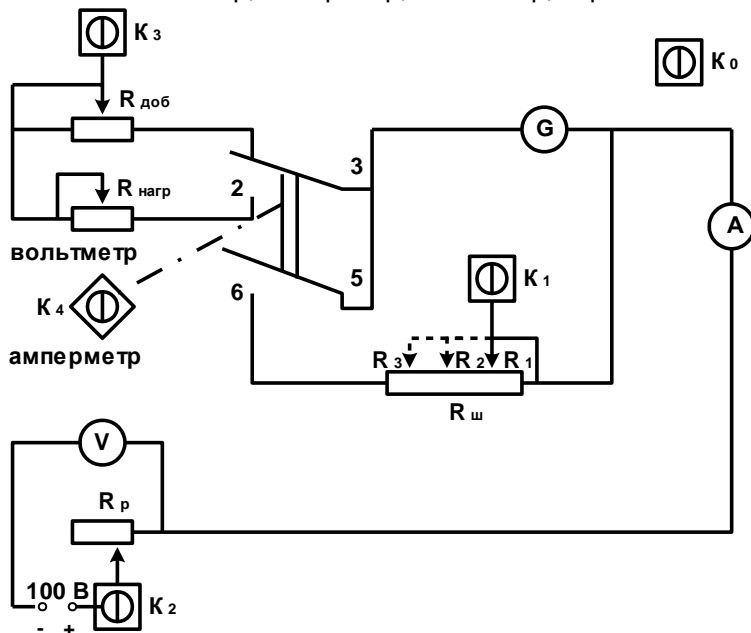


Рисунок 2.5 – Схема лабораторной установки

4 Порядок проведения работы

Выбрать вариант индивидуального задания по таблице 2.1. Включить установку тумблером K_0 .

4.1. Градуировка гальванометра в режиме вольтметра, определение его внутреннего сопротивления. Градуировка прибора заключается в определении численных значений измеряемой величины, соответствующих делениям шкалы градуируемого прибора. В данном случае необходимо произвести замеры в любых пяти точках, равномерно расположенных по всей длине шкалы гальванометра (микроамперметра) G .

Таблица 2.1 – Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Положение переключателей	
	K_1	K_2
1	2, 3, 4	1, 4, 11
2	1, 6, 7	1, 7, 10
3	5, 6, 7	2, 5, 10
4	8, 9, 10	3, 6, 9
5	2, 5, 10	1, 3, 8
6	2, 5, 7	4, 7, 8
7	6, 9, 11	2, 6, 10
8	3, 6, 9	5, 8, 7
9	3, 7, 9	2, 6, 11
10	2, 4, 6	6, 9, 8
11	1, 2, 11	3, 5, 7
12	3, 5, 9	7, 10, 5

Поставить переключатель K_4 в положение «вольтметр», а тумблер K_3 в одно из положений согласно номеру варианта. Изменяя при помощи ручки K_2 напряжение V , отградуировать гальванометр G . Повторить градуировку при двух других значениях K_3 . Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

Для определения внутреннего сопротивления гальванометра установить тумблер K_3 в положение «1». При этом $R_{доб} = 8 \text{ кОм}$. Изменяя одновременно ток и напряжение, определить внутреннее сопротивление гальванометра.

4.2. Градуировка гальванометра в режиме амперметра, определение его внутреннего сопротивления.

Поставить переключатель K_4 в положение «Вольтметр», тумблер K_1 в одно из трех положений согласно номеру варианта. Изменяя при помощи ручки K_2 ток, отградуировать гальванометр G .

Повтор градуировки провести при двух других значениях K_1 . Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений и их обработка

№ опыта	К4 в положении «вольтметр»			К4 в положении «амперметр»		
	положение K_3	показания гальванометра, %	показания вольтметра, В	положение K_1	показания гальванометра, %	показания амперметра, А
1						
2						
...						
14						
15						

Для определения внутреннего сопротивления гальванометра установить тумблер K_1 в положение «1». При этом $R_{ш} = 100$ Ом. Измеряя одновременно ток и напряжение, определить внутреннее сопротивление гальванометра.

5 Обработка результатов измерений

5.1. Построить градуировочные зависимости для различных положений K_3 и K_1 : по оси абсцисс – ток, мВ; по оси ординат – количество делений шкалы прибора. Сделать вывод о влиянии $R_{доб}$ и $R_{ш}$ на диапазон показаний и чувствительность гальванометра.

5.2. Ознакомиться с использованием магнитоэлектрических гальванометров в качестве вторичного прибора для измерения температуры (милливольтметр М-64, нуль прибор на ПП-63 и термopара). Выбрать из таблице 2.3 вариант задания в соответствии с номером и произвести расчет суммарной погрешности средства измерения.

Таблица 2.3 – Варианты индивидуальных заданий

Номер индивидуального задания	Класс точности милливольтметра	Шкала милливольтметра, °С	Тип используемой термopары	Измеряемая температура, °С
1	2	3	4	5
1	1,0	1100	ТХА	450
2	1,5	1100	ТВР	850
3	1,0	200-800	ТХА	730
4	1,5	0-1500	ТВР	1350
5	2,5	400-800	ТПР	500
6	1,0	0-450	ТХК	400

Приближенное значение предельной погрешности показаний (δ_k) для комплекта определяется по формуле

$$\delta_k = \pm \sqrt{\delta_M^2 + \delta_T^2 + \delta_{ТП}^2}, \quad (2.10)$$

где δ_M – погрешность показания милливольтметра; δ_T – погрешность из-за отклонения термоэдс термодпары от значений градуировочной таблицы; $\delta_{ТП}$ – погрешность из-за отклонения эдс в паре между жилами термоэлектрических проводов.

Погрешность показаний милливольтметра определяется по формуле

$$\delta_M = \pm \frac{\Delta t_M}{t} \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

где t – измеряемая температура, Δt_M – предел допускаемой абсолютной погрешности показаний милливольтметра при заданном диапазоне измерений (по температуре);

Δt_M – определяется через ΔE_M по таблице П5.

$$\Delta E_M = \pm \frac{\delta E_d}{100\%}, \quad (2.12)$$

где E_d – диапазон измерений, мВ; δ – класс точности прибора.

Погрешность из-за отклонения т.э.д.с. равна

$$\delta_T = \pm \frac{\Delta t_T}{t} \cdot 100\% \quad (2.13)$$

где Δt_T – допускаемое отклонение температуры за счет отклонения т.э.д.с. термодпары; определяется через ΔE_T (по таблицам П5, П6).

Погрешность из-за отклонения т.э.д.с. в паре между жилами термоэлектродных проводов определяется из выражения

$$\delta_{ТП} = \pm \frac{\Delta t_{ТП}}{t} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

где $\Delta t_{ТП}$ – допускаемое отклонение температуры за счет т.э.д.с. в паре между жилами термоэлектродных проводов; $\Delta t_{ТП}$ – определяется через $\Delta E_{ТП}$ (таблица П7).

6 Требования к отчету

Отчет должен содержать краткое теоретическое введение, описание работы, схему лабораторной установки, результаты измерений в виде таблиц, графики, а также их математические обработки.

7. Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия магнитоэлектрического гальванометра?

2. Как включается гальванометр в случае использования его в качестве вольтметра?
3. Как включается гальванометр в случае использования его в качестве амперметра?
4. В каких приборах используются гальванометры?
5. От чего зависит чувствительность гальванометра?
6. Что такое коэффициент шунтирования?
7. Из каких сплавов изготавливаются шунты?
8. От каких факторов зависят погрешности измерения т.э.д.с.?
9. Как определяется погрешность показаний милливольтметра?
10. Какими методами обеспечивают снижение влияния сопротивления внешней цепи и отклонение температуры свободных концов от градуировочной?

Лабораторная работа 3. Термоэлектрические термометры

1. Цель работы

Изучить устройство и принцип действия термоэлектрических термометров, методику измерения температуры с помощью термопары и потенциометра, методику проведения контрольно-поверочных измерений.

2. Теоретическое введение

Для измерения температуры в металлургии наиболее широкое распространение получили термоэлектрические термометры, работающие в интервале температур от -200 до 2500 °С и выше. Данный тип устройства характеризуют высокая точность и надежность, возможность использования в системах автоматического контроля и регулирования.

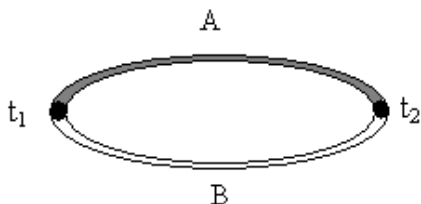


Рисунок 3.1 – Схема термопары

Сущность термоэлектрического метода заключается в возникновении электродвижущей силы (э.д.с.) в проводнике, концы которого имеют различную температуру. В зависимости от величины перепада температур и природы проводника (состав, физическое состояние) величина э.д.с. колеблется в значительных пределах. Для того, чтобы измерить возникшую э.д.с., ее сравнивают с э.д.с. другого проводника, образующего с первым термоэлектрическую пару АВ, в цепи которой течет ток (рисунке 3.1).

Результирующая термоэлектродвижущая сила (т.э.д.с.) цепи, состоящей из двух разных проводников А и В (одинаковых по длине) равна

$$\begin{aligned} E_{AB}(t_2, t_1) &= e_{AB}(t_2) + e_{BA}(t_1) \text{ или} \\ E_{AB}(t_2, t_1) &= e_{AB}(t_2) - e_{AB}(t_1), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $e_{AB}(t_2)$ и $e_{AB}(t_1)$ – разности потенциалов проводников А и В соответственно при температурах t_2 и t_1 , которая не зависит от размеров термоэлектродов (длины, диаметра), величин теплопроводности и удельного электросопротивления.

При отсутствии перепада температур, $t_1 = t_2$, т.э.д.с. каждого проводника будет равна 0 и результирующая т.э.д.с. $E_{AB}(t_2, t_1) = 0$.

По этой причине включения в цепь третьего проводника С, имеющего одинаковую температуру концов, в один из спаев (рисунок 3.2 а) или в разрыв одного термоэлектрода (рисунок 3.2 б) не изменяет т.э.д.с. термопары, т.к. собственная э.д.с. проводника равна нулю.

Для получения зависимости т.э.д.с. только от одной температуры t_2 необходимо температуру t_1 поддерживать на постоянном уровне, обычно при 0 или 20 °С.

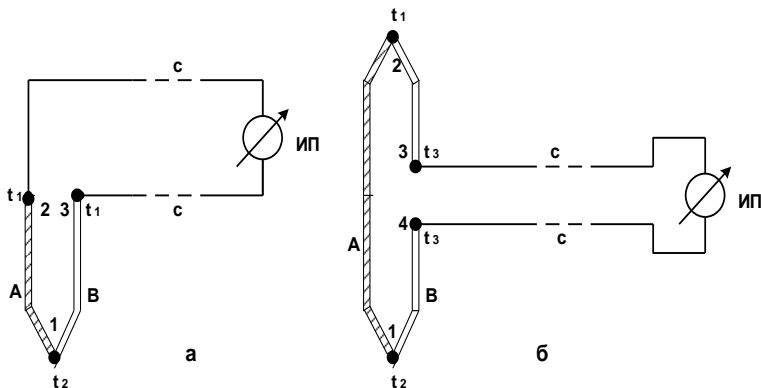


Рисунок 3.2 – Схемы включения измерительного прибора в цепь термопары: а – к свободным концам; б – в разрыв термоэлектрода

Спай, помещаемый в измеряемую среду, называют горячим или рабочим концом термопары; спай, температуру которого поддерживают постоянной, холодным или свободным концом.

Для измерения возникающей т.э.д.с. в контур термопары в холодный спай (см. рисунок 3.2 а) или в разрыв одного из термоэлектродов (см. рисунок 3.2 б) с помощью проводов С включают измерительный прибор ИП. В первом случае (см. рисунок 3.2 а) в схеме три спаи: горячий 1 и два холодных 2 и 3, которые должны находиться при постоянной температуре. Во второй схеме включения (см. рисунок 3.2 б) имеются четыре спаи: горячий 1, холодный 2 и нейтральные 3 и 4, причём температура последних t_3 должна быть одинаковой. Для правильного включения ИП температуры в обоих местах присоединения третьего проводника должны быть одинаковыми, что исключает образование дополнительных «паразитных» термопар, т.э.д.с. которых искажала бы сигнал основной термопары.

Для увеличения чувствительности термоэлектрического метода измерения температуры в ряде случаев применяют термобатарей: несколько последовательно включенных термопар, рабочие концы которых находятся при температуре t_2 , а свободные - при известной и постоянной температуре t_1 . При параллельном включении происходит усреднение сигнала т.э.д.с.

Для контроля разности температур двух объектов или различных точек одного объекта используется дифференциальная термопара, у которой одноименные электроды А включены навстречу друг другу, а к другим В

подключен ИП. Рабочие спаи имеют разные температуры, а свободные концы – одинаковую.

К термоэлектродным материалам предъявляются следующие требования: высокое значение развиваемой т.э.д.с; стабильность характеристики в течение значительного периода времени и высоких температур; воспроизводимость и линейная зависимость т.э.д.с. от температуры; однородность термоэлектрических свойств по длине проводника; легкость технологической обработки и получения сплава одинакового состава, хорошие экономические показатели (низкая стоимость, недефицитность).

Большое значение для развиваемой т.э.д.с. определяет чувствительность устройства: отношение $\Delta E / \Delta t$, т.е. отношение приращения т.э.д.с. ΔE к величине изменения температуры Δt , вызвавшее данное приращение сигнала. Данный показатель для технических термоэлектрических термометров находится в пределах 0,01-0,06 мВ/°С. Чем больше это значение, тем менее чувствительный, но более дешевый и надежный вторичный прибор можно использовать в комплекте с термопарой.

Выбор материалов термоэлектродов в значительной степени определяется уровнем температуры и агрессивным воздействием измеряемой среды. Платина и ее сплавы с родием хорошо работают в окислительной и нейтральной средах, вольфрам, молибден, рений и их сплавы - в вакууме, нейтральной и восстановительной средах. Науглероживание проволоки искажает термоэлектрическую характеристику платины и приводит к погрешностям в измерении. Значительный опыт эксплуатации различных термопар привел к тому, что в настоящее время количество применяемых в технике измерения материалов невелико.

Термоэлектрический термометр (ТТ) – это измерительный преобразователь, чувствительный элемент которого (термопара) расположен в специальной защитной арматуре, обеспечивающей защиту термоэлектродов от механических повреждений и воздействия измеряемой среды. На рисунке 3.3 показана конструкция технического ТТ.

Арматура включает защитный чехол 1 с подвижным штуцером 2 и головку 3, внутри которой расположено контактное устройство 4 с зажимами для соединения термоэлектродов 5 с проводами, идущими от измерительного прибора к термометру. Термоэлектроды по всей длине изолированы друг от друга и от защитной арматуры керамическими трубками (бусами) 6. Специальная замазка 8 герметизирует внутреннее пространство защитного чехла термометра, который выполняется из газонепроницаемых материалов, выдерживающих высокие температуры и агрессивное воздействие среды. При температурах до 1000 °С применяют металлические чехлы из углеродистой или коррозионностойкой стали, при более высоких температурах – керамические чехлы: фарфоровые, карбофраксовые, алундовые, из диборида и др.

В качестве термоэлектродов используется проволока диаметром 0,5 мм (благородные металлы) и до 3 мм (неблагородные металлы). Спай 7 на рабочем конце термопары образуется сваркой, пайкой или скручива-

нием. Последний способ используется для вольфрам-рениевых и вольфрам-молибденовых термопар.

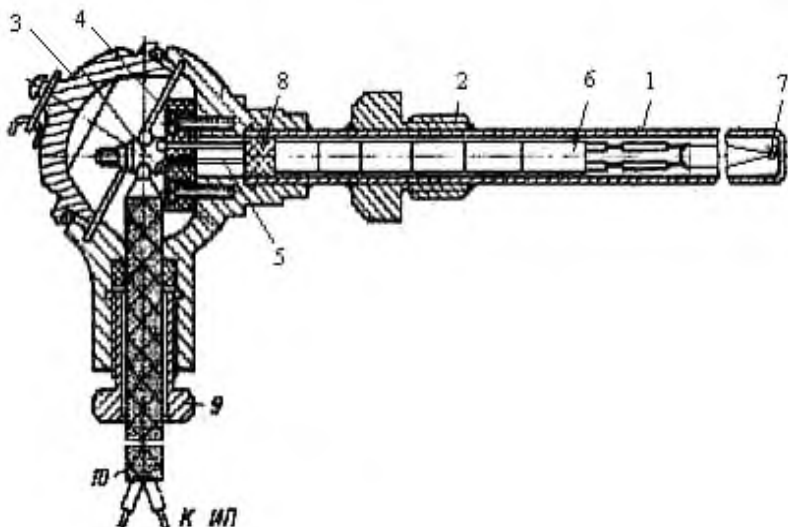


Рисунок 3.3 – Схема технического термоэлектрического термометра

Конструкция технического ТТ предусматривает возможность в процессе эксплуатации извлекать из защитной арматуры термоэлектроды в сборе для проведения поверки или замены. Головка снабжена уплотнением, исключающим попадание пыли и влаги во внутреннюю полость устройства.

Термоэлектрические термометры выпускают двух видов: погружаемые и поверхностные. У последних рабочий спай приводится в непосредственный контакт с измеряемой поверхностью. Приборостроительная промышленность изготавливает устройства различных модификаций, отличающихся: по значению и условиям эксплуатации, по материалу защитного чехла, по способу установки термометра в точке измерения, по герметичности и защищенности от действия измеряемой среды, по устойчивости к механическим воздействиям, по степени тепловой инерционности и т.п.

Конструктивное оформление ТТ весьма разнообразно, что позволяет их применять в различных условиях. Имеется также унифицированная арматура, которая обеспечивает взаимозаменяемость ряда моделей термоэлектрических термометров с термометрами сопротивления. Каждая модель изготавливается с различной длиной погружаемой (монтажной) части ТТ, которая изменяется от 10 до 3150 мм. Длина монтажной части термометров, выпускаемых без защитной арматуры (гибкие ТТ), может достигать 10000 мм.

Перспективной конструкцией гибких ТТ являются кабельные или бронированные оболочковые термопары (рисунок 3.4). Методом сухого

прессования изготавливают двух- или четырехканальные электроизоляционные бусы 1, в которых размещают хромель-копелевые или хромель-алюмелевые электроды 2 диаметром 0,2-1,2 мм. Изолированная термопара затягивается в металлическую трубку 3 и волочением, получают кабельный ТТ. Максимальная длина 100 м, диаметр от 1,0 до 7,2 мм.

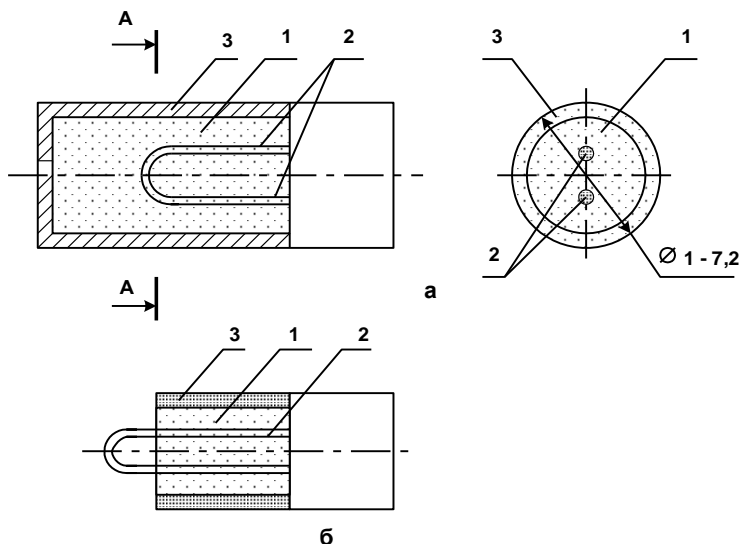


Рисунок 3.4 – Конструкция кабельного термоэлектрического термометра с изолированным (а) и открытым (б) спаем

Для измерений в металлургии наиболее широко применяют ТТ со стандартной градуировкой: платинородий-платина (ТПП), платино-родий-платинородий (ТПР), хромель-алюмель (ТХА), хромель-копель (ТХК), вольфрамений-вольфрамений (ТВР). В ряде случаев используют также ТТ с нестандартной градуировкой: медь-константан, вольфрам-молибден (ТВМ) и др. В табл. П4 приведены некоторые характеристики, а на рисунке 3.5 – градуировочные кривые ряда термопар.

Наиболее точным является платинородий-платиновый ТТ, который используется также в качестве рабочих эталонов и образцовых термометров 1-го, 2-го и 3-го разрядов. Однако вследствие высокой стоимости и небольшой величины развиваемой т.э.д.с. ТТ платиновой группы применяются для измерений высоких температур, но в последнее время их заменяют более дешевыми термометрами типа ТВР и ТВМ (например, при измерении температуры жидкой стали).

При низких температурах (до 600 °С) наиболее предпочтительным является ТТ типа ТХК. В интервале температур 600-1000 °С обычно применяется ТТ типа ТХА. Они развивают значительную т.э.д.с. (особенно ТХК), дешевы, хорошо противостоят окислению в воздушной среде и являются самыми распространенными.

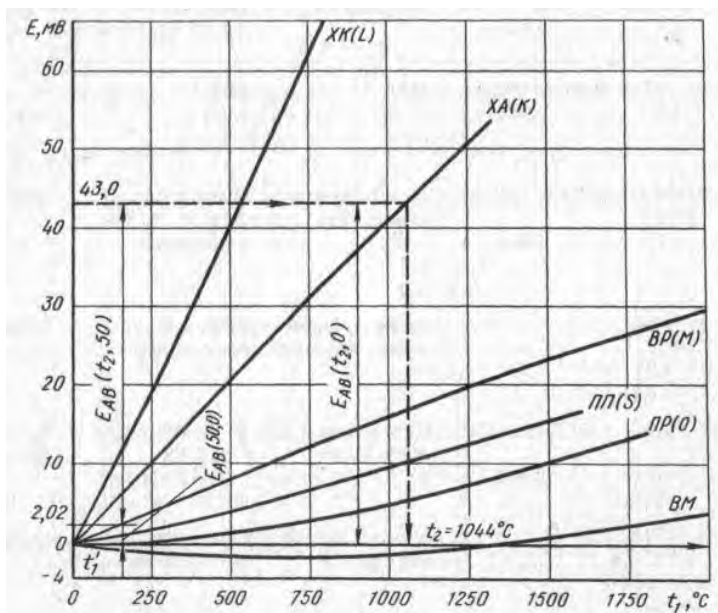


Рисунок 3.5 – Градуировочные характеристики термомпар

Вольфрам-рениевый ТТ позволяет измерять температуры до 2000-2500 °С в вакууме, нейтральной и восстановительной средах. Данный термометр имеет три стандартные характеристики, что позволяет получить достаточно точные показания. Без возобновления рабочего спая можно производить до 40 кратковременных погружений в расплав жидкой стали. Изменение градуировочной характеристики при этом не превышает ± 4 °С.

Вольфрам-молибденовый термометр ТВМ работает в вакууме, восстановительных и нейтральных средах и применяется для измерения температуры жидкой стали. Недостатками являются небольшая т.э.д.с., нестандартность характеристики от партии к партии, а также наличие инверсии градуировочной кривой. Вольфрам-молибденовый термометр развивает значительную т.э.д.с. (одного знака), градуировочная характеристика его практически линейна; позволяет производить длительные измерения в вакууме (на воздухе только кратковременное применение), но рабочий спай выдерживает без разрушений только 3-4 погружения в высокотемпературный расплав; градуировочная характеристика также нестандартная.

Для замера высоких температур используют термоэлектрические термометры из тугоплавких соединений: борид циркония, карбид титана, графит, дисилицид вольфрама и др.

В условиях длительной эксплуатации при высоких температурах и агрессивном воздействии сред возникает нестабильность градуировочной характеристики, которая является следствием ряда причин: загрязнения материалов термоэлектродов примесями защитных чехлов, керамических изоляторов и атмосферы печи; испарения одного из компонентов сплава;

взаимной диффузии через спай. Величина отклонения может быть значительной и резко увеличивается с ростом температуры и длительности эксплуатации.

Поправка на температуру свободных концов ТТ. Т.э.д.с., развиваемая данным ТТ, зависит от перепада температур между рабочим спаем и свободными концами, которые в технических термометрах отстоят друг от друга на расстоянии не более 2-3 м. Таким образом, температура свободных концов, расположенных в головке ТТ, может изменяться в пределах 10-80 °С вследствие колебаний температуры окружающей среды, а также тепловых процессов, проходящих в металлургических агрегатах или около них.

Повышение температуры свободных концов ТТ приводит к уменьшению перепада температур, снижению т.э.д.с. термопары и появлению погрешности измерения, которую исключают введением соответствующей поправки. Например, при неизменной температуре рабочего спая t_2 температура свободных концов t_1 (принимаемая для стандартных градуировок 0 °С) увеличилась и стала равной t_1' . На основании уравнения (3.1) можно определить разность между двумя значениями т.э.д.с, соответствующими двум перепадам температур

$$E_{AB}(t_2, t_1) - E_{AB}(t_2, t_1') = e_{AB}(t_2) - e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2) + e_{AB}(t_1').$$

Затем после сокращения $e_{AB}(t_2)$ получим

$$E_{AB}(t_2, t_1) - E_{AB}(t_2, t_1') = e_{AB}(t_1') - e_{AB}(t_1) = E_{AB}(t_1', t_1).$$

Преобразуя данное выражение, получим уравнение

$$E_{AB}(t_2, t_1) = E_{AB}(t_2, t_1') + E_{AB}(t_1', t_1), \quad (3.2)$$

из которого следует, что увеличение температуры свободных концов уменьшает сигнал термопары на величину т.э.д.с., развиваемую аналогичной термопарой, имеющей температуры рабочего спая и свободных концов, соответственно, t_1' и t_1 . Если $t_1' < t_1$, то поправка $E_{AB}(t_1', t_1)$, в уравнении (3.2) имеет отрицательный знак.

$$E_{AB}(t_2, 0) = E_{AB}(t_2, 50) + E_{AB}(50, 0) = 40,98 + 2,02 = 43,00 \text{ мВ},$$

Это соответствует температуре рабочего спая $t_2 = 1044$ °С.

Для исключения влияния изменения температуры свободных концов ТТ в технике измерения пользуются двумя способами:

1. эвакуацией свободных концов из зоны непосредственного измерения с помощью компенсационных проводов;
2. стабилизацией температуры свободных концов с помощью термостатов.

3 Описание установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.6 в нее входят 2 самопишущих потенциометра типа КСП-4:

№ 1, шкала 0-50 мВ, предназначен для снятия термо-эдс ПП-1;

№ 2, шкала 0-50 мВ, предназначен для снятия термо-эдс термопар X_1 и X_2 .

Подключение термопар X_1 и X_2 осуществляется при помощи тумблера K_1 . Холодные спаи термопар X_1 и X_2 находятся в печи 1, температуру в которой регулируют при помощи реостата (ручка K_3). Горячие спаи термопар находятся в печи 2, температуру которой регулируют при помощи реостата (ручка K_2).

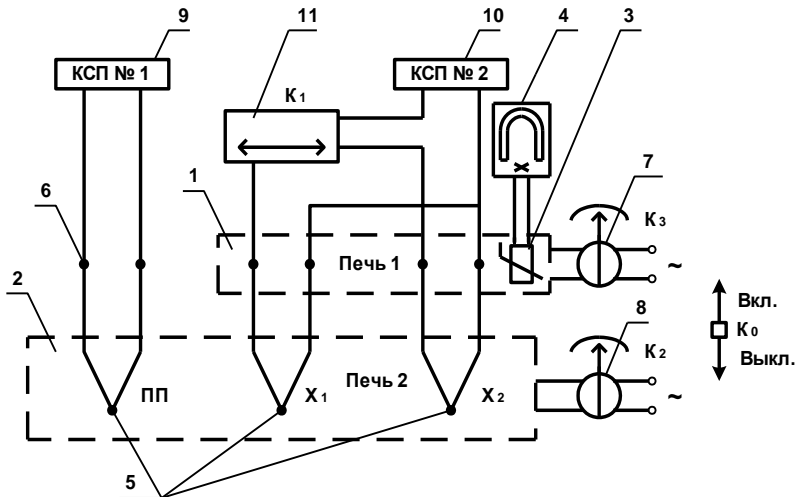


Рисунок 3.6 – Схема лабораторной установки

1 – печь для нагрева холодных спаев термопар; 2 – печь для нагрева рабочих спаев термопар; 3 – термометр сопротивления для замера температуры в печи; 4 – логометр; 5 – рабочие спаи термопар; 6 – свободные спаи термопар; 7 – латр для регулирования напряжения в спиралях печи 1; 8 – латр для регулирования напряжения в спиралях печи 2; 9 – КСП № 1 для определения температуры в печи 1; 10 – КСП № 2 для определения температуры в печи 1 с учетом температуры холодных спаев термопар; 11 – переключатель термопар (K_1).

4 Порядок проведения работы

4.1. Определить тип термопары и провести контрольно-поверочные измерения.

Выбрать из таблицы 3.1 индивидуальное задание в соответствии с вариантом.

Включить установку тумблером K_0 , выставить ручку K_1 и K_2 в соответствии с вариантом и включить диаграммную ленту потенциометров.

После стабилизации температуры (3-5 мин.) снять показания потенциометров и занести в таблицу 3.3.

Измерения повторять при других температурах, заданных в варианте (ручка K_2).

Таблица 3.1 – Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	Положение переключателей				
	K_1	K_2			
1	2	3			
1	X_1	1	3	4	5
2	X_1	2	7	8	9
3	X_1	3	7	8	10
4	X_1	1	4	5	9
5	X_1	1	5	7	8
6	X_2	1	3	4	9
7	X_2	2	7	8	9
8	X_2	3	7	8	10
9	X_2	1	4	5	9
10	X_2	1	5	7	8
11	X_1	2	6	8	10
12	X_1	1	5	9	10

Таблица 3.2 – Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	Положение регуляторов					
	K_1	K_3	K_2			
1	X_1	1	1	2	3	4
2	X_1	2	2	8	6	5
3	X_1	3	3	7	8	9
4	X_1	4	4	6	9	10
5	X_1	5	4	7	6	3
6	X_2	6	2	3	5	7
7	X_2	7	1	4	6	8
8	X_2	8	1	3	7	9
9	X_2	9	2	9	8	7
10	X_2	10	1	2	5	7
11	X_1	10	1	2	3	4
12	X_1	9	2	8	6	5

5 Обработка результатов

5.1. Результаты измерений по пункту 3.1 занести в таблицу 3.3.

5.1.1. Пользуясь табл. П5, показания ТПП перевести в °С, принять за действительное значение температуры и занести в таблицу 3.3.

5.1.2. Пользуясь таблицы П5 и показаниями ТПП, определить тип неизвестной термопары.

Показания термопары X_1 (или X_2) перевести в °C и занести в таблицу 3.3.

5.1.3. Выявить величину систематической погрешности в результатах, полученных с помощью термопары X_1 (или X_2) по отношению к результатам, полученных с помощью ТПП. Расчет произвести для температуры, выраженной в °C (столбцы 5 и 6). Результаты расчетов занести в таблицу 3.3.

5.1.4. Определить класс точности измерительной установки.

5.2. По результатам измерений по пункту 4.2 построить зависимость показаний ТПП от термопары X_1 (X_2): по оси абсцисс показание ТПП (мВ или °C), по оси ординат показание X_1 (X_2) (мВ или °C).

Таблица 3.3 – Результаты измерений

Показания термопары ТПП		Показания термопары X_1 или X_2		Рассчитанная величина систематической погрешности	Исправленные значения
мВ	°C	мВ	°C	°C	°C

6 Требования к отчету

Отчет должен содержать краткое теоретическое введение, схему лабораторной установки, ее краткое описание, таблицу результатов измерений, их математическую обработку и графики.

7 Контрольные вопросы

1. Какие законы лежат в основе действия термопары?
2. В чём заключается физическая природа термоэлектричества?
3. Как учитывается в показаниях термопары температура холодных концов?
4. Что такое «удлинительные» провода и для чего они используются?
5. В каких средах и при каких температурах можно использовать различные типы термопар?
6. С помощью каких устройств проверяются термопары?
7. Какие требования предъявляются к материалам термоэлектродов?
8. От чего зависит величина поправки на изменение температуры свободных концов?
9. Что такое чувствительность термоэлектрического термометра?
10. В каких случаях применяют параллельное и последовательное соединение термопар?

Лабораторная работа 4. Измерение температуры электрическими термометрами сопротивления

1. Цель работы

Изучить устройство и принцип действия термометров сопротивления, работающих с мостовыми схемами и влияние изменения сопротивления линии на разбаланс моста.

2. Теоретическое введение

В металлургической практике для измерения температур от -260 до 750 °С применяют термометры сопротивления (ТС), принцип действия которых основан на использовании зависимости электрического сопротивления проводника от температуры. Зная данную зависимость, по изменению величины сопротивления термометра, судят о температуре среды, в которую он погружен. Выходным параметром устройства является электрическая величина, которая может быть измерена с весьма высокой точностью, передана на большие расстояния и непосредственно использована в системах автоматического контроля и регулирования.

В качестве материалов для изготовления чувствительных элементов ТС используются чистые металлы: платина, медь, железо, никель и полупроводники. Изменение электросопротивления материала при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом сопротивления α_t (1/°С), который вычисляется по формуле

$$\alpha_t = (R_t - R_0) / (R_0 t), \quad (4.1)$$

где t – температура материал, °С; R_0 и R_t – электросопротивления соответственно при 0 °С и температуре t , Ом.

Чистые металлы имеют практически линейную зависимость электросопротивления от температуры и положительный температурный коэффициент сопротивления, достигающий $0,004-0,006$ 1/°С, т.е. увеличение температуры на 1 °С приводит к повышению сопротивления приблизительно на $0,4-0,6\%$ от величины сопротивления при 0 °С.

Материал чувствительного элемента ТС должен иметь высокое удельное сопротивление, что обеспечивает небольшие габариты термометра; значительный коэффициент α_t для получения высокой чувствительности устройства; хорошую воспроизводимость состава; стойкость к агрессивному воздействию окружающей среды при повышенных температурах; стабильность характеристики во времени; хорошие экономические показатели; линейность характеристики.

Наиболее хорошо указанным требованиям отвечают платина (интервал температур $-260 \div +750$) °С и медь ($-50 \div +180$) °С. Специальная конструкция платинового термометра сопротивления (ТСП) позволяет повысить верхний предел измерения до 1100 °С.

Платина является основным материалом для изготовления ТС. Она характеризуется достаточно высоким удельным сопротивлением ($\rho_0 = 0,0981 \cdot 10^{-6}$ Ом·м), устойчива к окислительной среде, имеет стабильную и хорошо воспроизводимую градуировку от партии к партии. К недостаткам следует отнести высокую стоимость, возможность загрязнения и охрупчивания в восстановительной среде и др. Однако достоинства платины обеспечивают более точные измерения температур с помощью ТСП (классы точности 1 и 2).

К достоинствам меди следует отнести низкую стоимость, линейную зависимость сопротивления от температуры, возможность получения тонкой проволоки высокой степени чистоты и в различной изоляции. Недостаток медных термометров сопротивления (ТСМ) заключается в низком верхнем пределе измерения (180 °С), что вызвано значительным окислением меди при высоких температурах из-за разрушения изоляции (классы точности 2 и 3). Медь имеет малое удельное сопротивление ($\rho_0 = 0,0155 \cdot 10^{-6}$ Ом·м).

В диапазоне температур от (-50) до ($+180$) °С сопротивление меди находится в линейной зависимости от температуры

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (4.2)$$

где R_0 и R_t – соответственно сопротивления ТСМ при температурах 0 °С и t , Ом.

Полупроводниковые термометры сопротивления (ТСПП) или терморезисторы имеют значительно больший температурный коэффициент сопротивления (2-20 %/К) отрицательный у термисторов (2-7 %/К), положительный у позисторов (2-20 %/К). При очень низких температурах полупроводники, обычно, являются изоляторами, при высоких – зависимость их сопротивления от температуры может быть выражена в виде экспоненциальной функции.

ТСПП получили достаточно широкое распространение в лабораторной и промышленной практике вследствие высокого температурного коэффициента (высокая чувствительность), простоты изготовления, прочности, небольших габаритов (малая инерционность). Их сопротивление велико (от 1 кОм до 1 МОм), что также повышает точность контроля температуры, так как изменением сопротивления клемм и соединительных проводов можно практически пренебречь.

Термисторы состоят, главным образом, из смесей оксидов металлов: кобальто-марганцевых, медно-марганцевых, медно-кобальто-марганцевых и др. Пределы контролируемых температур: $(-200) \div (+300)$ °С. При измерении низких температур вблизи 0 К наиболее часто используются германий и кремний, причем монокристаллический германий, легированный сурьмой, является эталонным ТС и воспроизводит температурную шкалу в диапазоне от 4,2 до 13,81 К.

Позисторы изготавливают из сегнетозлектрических керамик на основе титанатов, цирконатов свинца, бария, мышьяка и др. Они используются в сравнительно узком интервале температур (от 10 до 200 °С), но диапазон измерения для каждого типа позистора составляет примерно 20 °С, причем в этом интервале сопротивление изменяется на несколько десятков процентов. Использование позисторов в настоящее время ограничивается системами защиты от перегрева (например, электрических двигателей, подшипников и т.п.).

ТСПП имеют также существенные недостатки, которые ограничивают их применение в металлургии:

1. нелинейный характер зависимости сопротивления от температуры;
2. отсутствие воспроизводимости состава и градуировочной характеристики, что исключает взаимозаменяемость отдельных ТС данного типа и приводит к выпуску ТСПП с индивидуальной градуировкой.

При измерении температуры с помощью ТС необходимо учитывать, что чувствительный элемент у металлических ТС имеет большую длину и полученный результат характеризует среднюю температуру измеряемой среды в данном районе. Другим источником методической погрешности является наличие тока, протекающего через чувствительный элемент ТС и вызывающего его нагрев, что может исказить картину теплообмена в месте измерения. При температуре тающего льда величина этой погрешности для ТСП и ТСМ не превышает соответственно 0,2 и 0,4 °С (рассеиваемая мощность $ТС \leq 10\text{мВт}$).

ТС делят на эталонные (ТСП), образцовые (ТСП) и рабочие, которые в свою очередь подразделяются на лабораторные (ТСП, ТСМ) и технические (ТСП, ТСМ, ТСПП).

Эталонные ТС предназначены для воспроизведения и передачи шкалы ITS в интервале $(-259,34) \div (+630,74)$ °С. Для передачи температурной шкалы измерительным приборам низшего класса точности используются платиновые ТС 1-го и 2-го разрядов. В качестве эталонных, образцовых и лабораторных приборов повышенной точности используются платиновые ТС конструкции П.Г. Стрелкова.

Технические ТС в зависимости от назначения и конструкции делятся на: погружаемые, поверхностные и комнатные (для помещений); защищенные и не защищенные от действия агрессивной среды; стационарные и переносные; термометры классов точности 1, 2 и 3 и т.д. По тепловой

инерции различают три группы: с большой, средней и малой инерционностью. Для последней группы постоянная времени не превышает 9 с.

Приборостроительная промышленность выпускает унифицированные конструкции ТС погружного типа, для измерения температур жидких и газообразных сред.

На рисунке 4.1 представлена конструкция промышленного ТС с неподвижным штуцером, обеспечивающим его установку в строго заданном положении. Подвижный штуцер позволяет регулировать глубину погружения термометра при измерении температуры сред с условным давлением $p_y = 0,4$ МПа. При измерении температуры сред с высоким давлением на чехол ТС устанавливается специальная защитная (монтажная) гильза. Длина монтажной части технических ТС может изменяться от 60 до 3150 мм. Материал защитного чехла: латунь, алюминий, коррозионностойкие стали типа (08Х13, 12Х18Н10Т).

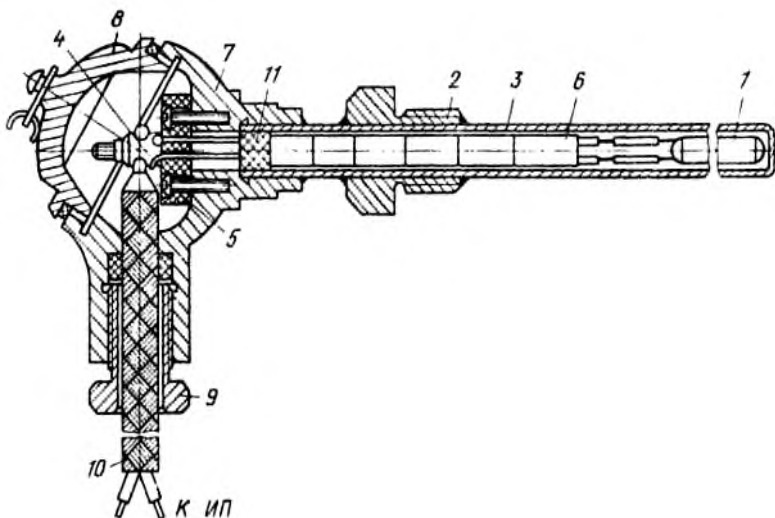


Рисунок 4.1 – Унифицированный термометр сопротивления

1 – чувствительный элемент; 2 – штуцер с резьбой; 3 – защитный чехол; 4 – соединительные провода; 5 – клеммная колодка; 6 – фарфоровые бусы; 7 – корпус головки; 8 – крышка; 9 – сальниковый ввод; 10 – монтажный кабель; 11 – герметик

Чувствительный элемент ТС выполнен из металлической тонкой проволоки с безындукционной (бифилярной) каркасной или бескаркасной намоткой. В качестве каркаса для платиновых термометров применяют плавленный кварц (эталонные, образцовые и технические) и керамику на основе оксида алюминия (технические). Каркас ТСМ изготавливается из пластмассы или металла.

На рисунке 4.2 (а) показан чувствительный элемент, состоящий из четырех (или двух) последовательно соединенных платиновых спиралей 2,

расположенных в каналах керамического каркаса 3. К верхним концам спиралей припаяны выводы 1, выполненные либо из платины, либо из сплава иридия с родием. Пространство между спиралью и каркасом заполнено порошком оксида алюминия 4, крепление спиралей и выводов в каркасе производится глазурью 5. Данный чувствительный элемент имеет ряд достоинств: герметичность, малую степень загрязнения платины глазурью, незначительные механические напряжения, высокую механическую прочность, небольшие габариты (диаметр 4,2 мм, длину 46 мм и 61 мм).

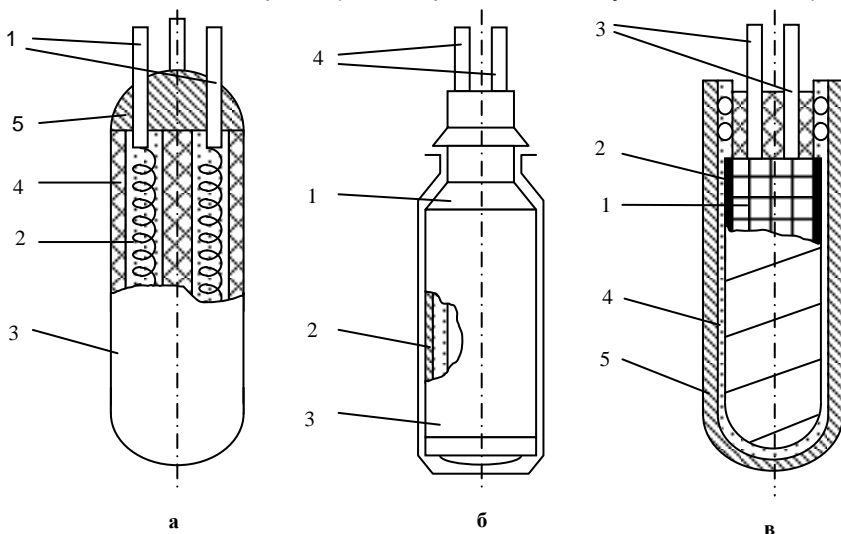


Рисунок 4.2 – Чувствительные элементы металлических термометров сопротивления

а – с керамическим каркасом; б – с каркасом из пластмассы; в - безкаркасный

На рисунке 4.2 (б) приведен чувствительный элемент 1 медного ТС, выполненный в пластмассовом каркасе медной изолированной проволокой 2. Герметизация безындукционной катушки, обеспечивается нанесением на поверхность слоя лака 3. Выводы 4 выполнены из меди. Снаружи чувствительный элемент защищен металлическим чехлом.

Чувствительный элемент 1 медного ТС, выполненный бескаркасной катушкой изолированной проволокой, показан на рисунке 4.2 (в). Снаружи он покрыт фторопластовой пленкой 2 и имеет медные выводы 3. Чувствительный элемент помещают в латунную трубку 5, засыпают керамическим порошком 4 и герметизируют. Такая конструкция обеспечивает хорошую виброустойчивость ТС. Диаметр медного чувствительного элемента 5 мм, длина 20, 50 или 80 мм.

Платиновые ТС изготавливаются из проволоки диаметром 0,03-0,1 мм (низкоомные 0,5 мм), медные – 0,05-0,1 мм. Безындукционная катушка

обеспечивает возможность включать ТС в схему измерения с приборами, питаемыми как постоянным, так и переменным током.

Метрологические требования, предъявляемые к градуировочным характеристикам металлических ТС, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Требования к градуировочным характеристикам металлических ТС

Тип ТС	Градуировка	Интервал измеряемых температур, °С	Номинальное сопротивление R_0 при 0 °С, Ом	Класс точности	Значение отношений R_{100}/R_0 и допустимые отклонения, Ом	Допустимое отклонение от номинального значения, %
Платиновый ТСП	10 П	-260÷650	10	I	1,391±0,0015 0,0005	±0,05
	Гр. 21	-200÷650	46			
	50 П	-200÷750	50	II	1,391±0,0015 0,0010	±0,1
	100 П	-260÷750	100			
Медный ТСМ	Гр. 23	-50÷180	53	II	1,428±0,0010	±0,1
	50 М	-50÷200	500			
	100 М	-50÷200	100	III	1,428±0,0020	±0,2

Взаимозаменяемость ТС достигается при помощи стандартных градуировок, в которой оговаривается сопротивление R_0 при 0 °С, отношение R_{100}/R_0 , а также допустимые значения их отклонений при переходе от одного термометра к другому (в пределах данного типа и класса).

Металлические ТС используют для измерения температуры воздуха, газообразного и жидкого топлива, кислорода, охлаждающей воды, пара, низкотемпературных продуктов сгорания в различных металлургических агрегатах.

Значительно реже в металлургической практике встречаются полупроводниковые термометры сопротивления. Их применяют в термореле, низкотемпературных регуляторах, обеспечивающих высокоточную стабилизацию чувствительных элементов газоанализаторов, хроматографов, корпусов пирометров, электродов термоэлектрических установок для экспресс-анализа состава металла и т.п. Чувствительные элементы ТСПП выполняются в виде небольших цилиндров – шайбочек, пластинок или бусинок.

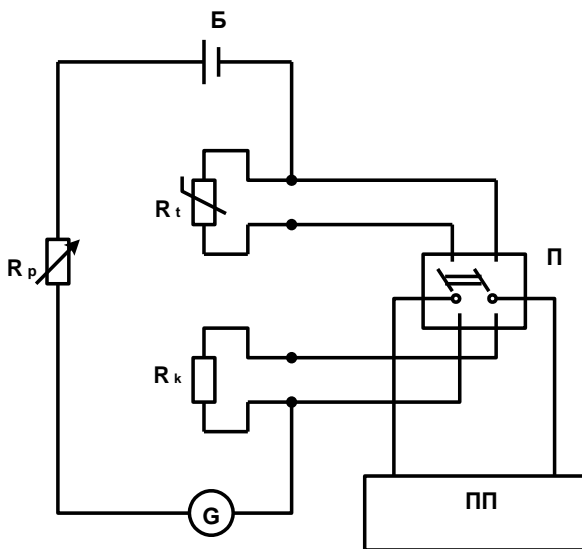


Рисунок 4.3 – Компенсационная схема измерения сопротивления ТС

Сопротивление поверяемого ТС измеряется компенсационным методом (рисунок 4.3). Термометр сопротивления R_t включен последовательно с образцовой катушкой сопротивления R_k (класс 0,01; 0,02). С помощью батареи Б и регулировочного сопротивления R_p устанавливается ток $I = 5$ мА, проходящий через ТС. Падения напряжения на ТС $U_t = IR_t$, на катушке $U_k = IR_k$ с помощью переключателя П последовательно подаются на низкоомный лабораторный потенциометр ПП класса 0,01 или 0,02. Искомую величину сопротивления R_t вычисляют по формуле

$$R_t = (U_t / U_k) R_k.$$

С помощью меггомметра проверяется электрическая изоляция ТС, которая должна выдерживать в течении 1 мин. напряжение 500 В переменного тока.

3 Описание установки

На рисунке 4.4 представлена схема лабораторной установки. Включение стэнда производится тумблером K_0 . В лабораторной работе используется потенциометр КСП-4 (шкала от $-0,1$ до 10 мВ) и стабилизированный источник питания $U_{\text{стаб}}$, предназначенный для питания моста сопротивле-

ний и заключенный в диагональ АВ. Двухпроводная и трехпроводная схемы подключения моста показаны на рисунке 4.5.

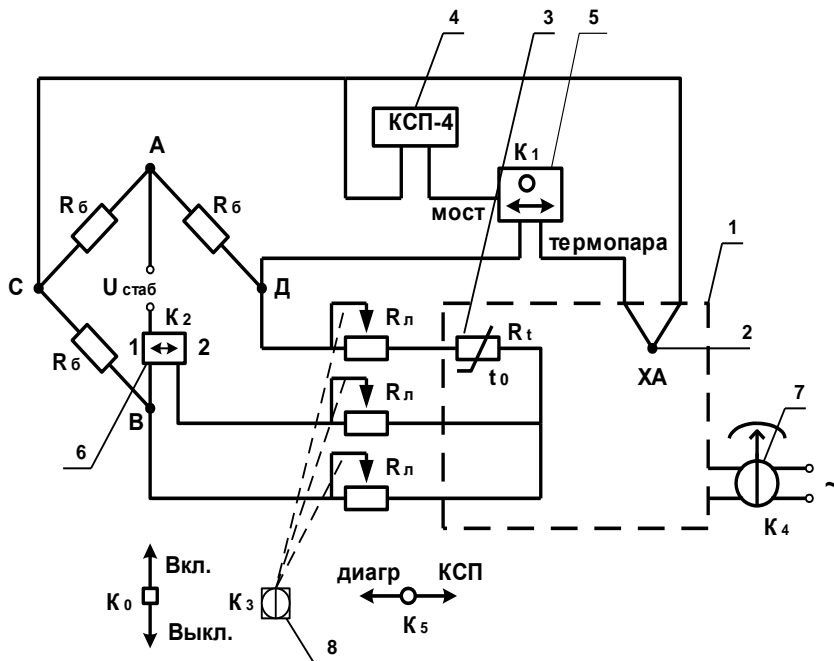


Рисунок 4.4 –Схема лабораторной установки

1 – печь для нагрева; 2 – термопара хромель-алюмелевая; 3 – термометр сопротивления R_t ; 4 – КСП-4 для снятия ЭДС с моста; 5 – переключатель K_1 между мостом и термопарой; 6 – переключатель K_2 для подключения источника питания к разным ветвям моста; 7 – латр для регулирования напряжения, подаваемого на печь; 8 – регулятор K_3 – для изменения сопротивления линии R_n

Термопара ХА или мост через тумблер K_1 подключается поочередно к КСП-4. Между точками моста ВД включены сопротивления линии, имитирующие длину проводов от регистрирующего прибора до объекта измерения температуры, и термосопротивление R_t . При помощи K_3 можно изменять сопротивление линии до 10 Ом.

При помощи тумблера K_2 можно запитывать измерительный мост стабилизированным источником питания ($U_{\text{стаб}}$) между точками АВ или точками АЕ. Термопара ХА и термосопротивление R_t находятся в печи, регулирование нагрева которой осуществляется реостатом K_4 . Включение диаграммы КСП-4 осуществляется тумблером K_5 .

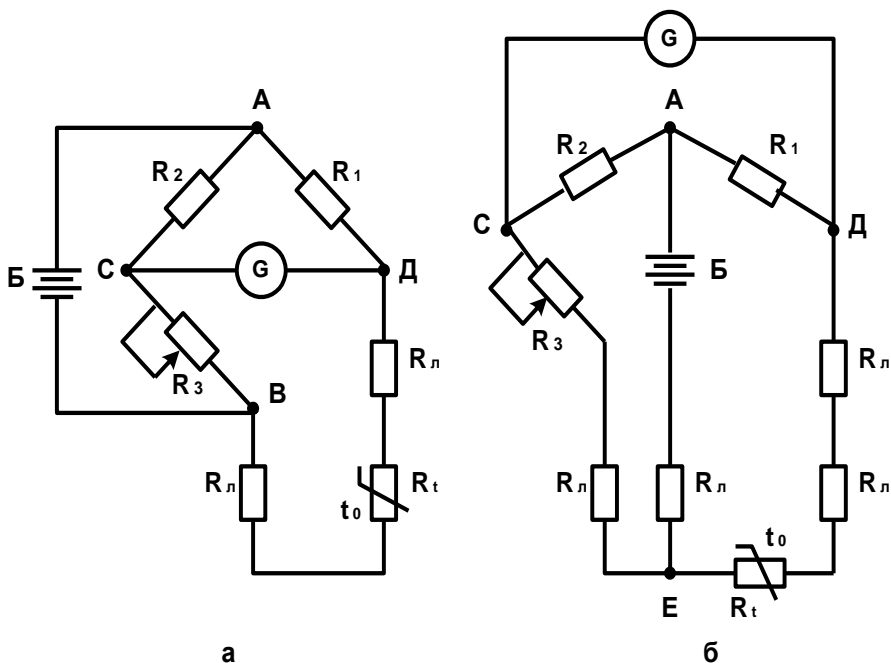


Рисунок 4.5 – Двухпроводная (а) и трехпроводная (б) схемы подключения моста

4 Порядок выполнения работы

4.1. Выбрать из таблицы 4.2 номер своего варианта.

4.2 Включить стенд тумблером K_0 , включить диаграмму КСП-4 тумблером K_5 . Замеры выполняются при 4-х различных температурах (K_4) неравновешенным мостом при 4-х различных сопротивлениях линии (K_3) при 2-х и 3-х проводной схеме подключения моста (K_2 в положении 1 или 2).

4.3. После установления значений температуры в печи (тумблером K_4) необходимо дождаться установления термического равновесия ($\tau = 3-5$ мин).

4.4. Измерить температуру в печи (показания КСП снимаются в мВ) и, используя таблицу П5, определить температуру печи в $^{\circ}\text{C}$.

4.5. Затем произвести измерения сопротивления и результаты занести в таблицы 4.3.

Так как мост работает неинерционно, выдержку перед проведением замера можно не делать.

Таблица 4.2 – Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	Положения переключателей							
	K ₃				K ₄			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0	3	5	7	0	2	5	7
2	0	3	6	9	1	3	6	8
3	0	4	7	10	2	4	7	10
4	0	2	5	8	3	6	8	10
5	0	1	4	7	2	5	7	9
6	0	3	6	9	4	6	8	10
7	0	2	4	6	0	4	7	9
8	0	2	5	8	2	3	7	10
9	0	1	4	7	4	7	8	10
10	0	2	5	9	1	5	6	9
11	0	3	7	10	1	3	5	8
12	0	1	5	8	4	7	9	10

Таблица 4.3 – Результаты измерений

Положение тумблера K ₄	Температура в печи		Разбаланс моста										
			Для двухпровод-				Для трехпровод-						
	мВ	°С	Положение переключателя K ₃										
			1	2	3	4	1	2	3	4			

5 Обработка результатов измерений

После выполнения всех измерений построить в одной системе координат график зависимости изменения разбаланса моста (в мВ) от температуры термосопротивления при фиксированных значениях сопротивлений линии, используя таблицу 4.3. Сравнить графики и сделать выводы.

По результатам замеров стоят графические зависимости $U = f(t)$ для 3-х проводной и 2-х проводной схемы подключения, где U – разбаланс моста.

Приняв результаты, полученные при помощи 3-х проводной схемы за образцовые, определить систематическую погрешность при замере по 2-х проводной схеме.

6 Требования к отчету

Отчет должен содержать: теоретическое введение, краткое описание установки, схему выполнения градуировочных работ и ее описание, результаты выполненной лабораторной работы с графическим их отображением и рассчитанными метрологическими характеристиками выполненных измерений (систематическая погрешность в зависимости от температуры).

7 Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия термометров сопротивления?
2. Каким выражением описывается зависимость сопротивления термометра от температуры?
3. В каких приборах (для измерения каких величин кроме температуры) используются еще термометры сопротивления?
4. Что такое термистор и какие материалы используются для его изготовления?
5. В чем преимущества и недостатки термисторов?
6. Как обеспечивается взаимозаменяемость термометров сопротивления?
7. С какими вторичными приборами могут работать термометры сопротивления?
8. Как подразделяются термометры сопротивления в зависимости от точности измерения, назначения, конструкции и тепловой инерции?

Лабораторная работа 5. Измерение температуры оптическим пирометром

1 Цель работы

Изучить устройство и принцип действия оптического пирометра, методику измерения температуры пирометром, методику определения действительной температуры по яркостной.

2 Теоретическое введение

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем большую энергию оно излучает.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют *пирометрами* излучения (ПИ) или просто пирометрами. Они позволяют контролировать температуры в широком интервале: от 100 до 6000 °С и выше. Одним из главных достоинств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, так как в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Поэтому данные методы получили название *бесконтактных*.

Тела характеризуются либо непрерывным спектром излучения (твердые и жидкие вещества), либо – селективным (газы). Участки спектра в интервале длин волн следующие: ультрафиолетовый 0,02 – 0,04 мкм; видимый 0,4 – 0,76 мкм, инфракрасный 0,76 – 400 мкм. *Интегральное излучение* – это суммарное излучение, испускаемое телом, во всем спектре длин волн. *Монохроматическим* называют излучение, испускаемое при определенной длине волны.

Физические объекты имеют различные оптические свойства: они по-разному поглощают, отражают и пропускают тепловые лучи. Законы излучения выведены для абсолютно черного тела (АЧТ), которое характеризуется тем, что оно поглощает все падающее на него излучение. Зависимость плотности потока спектрального излучения АЧТ от длины волны и температуры описывается уравнением Планка

$$I_{\lambda_0} = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1}, \quad (5.1)$$

где I_{λ_0} – плотность потока спектрального излучения, Вт/м³; λ – длина волны, м; T – температура, К, C_1 и C_2 – постоянные Планка.

Из рисунка 5.1 следует, что АЧТ испускает лучи всех длин волн от 0 до ∞ при всех температурах, отличных от абсолютного нуля. Плотность потока монохроматического излучения возрастает с повышением температуры, при этом максимум на кривой распределения энергии АЧТ смещается

в сторону коротких волн. Длина волны λ_{\max} , соответствующая максимальному значению и связана с температурой через закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ мК.} \quad (5.2)$$

Для определения плотности потока интегрального излучения АЧТ необходимо просуммировать значение $T_{\lambda,0}$ по всему спектру от $\lambda_1 = 0$ до $\lambda_2 = \infty$. Результатом является выражение, получившее название закона Стефана-Больцмана

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \quad (5.3)$$

где E_0 – плотность потока интегрального излучения АЧТ, Вт/м²; σ_0 – коэффициент излучения АЧТ.

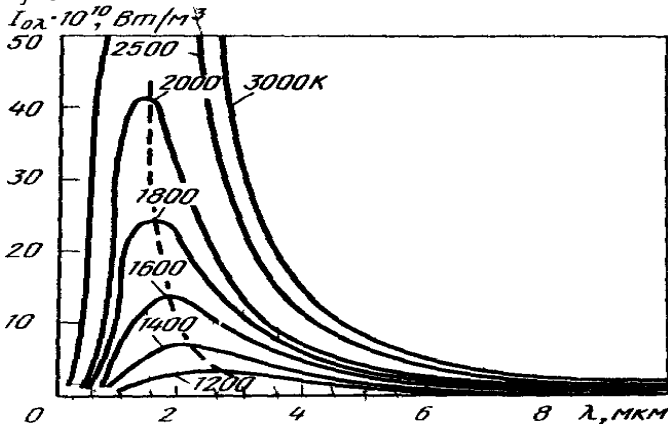


Рисунок 5.1 – Зависимость плотности потока спектрального излучения АЧТ от длины волны и температуры

Реальные тела при одинаковых температурах обладают меньшей плотностью потока излучения, которая характеризуется степенью черноты ϵ (спектральной ϵ_λ или полной ϵ_Σ). Коэффициенты ϵ_λ и ϵ_Σ зависят от температуры, химического состава и состояния поверхности и находятся в пределах $0 < \epsilon_\lambda, \epsilon_\Sigma < 1$. Если $\epsilon_\lambda < 1$ и не зависит от длины волны (так же как и у АЧТ), то такое излучение называется серым. На основании рассмотренных законов излучения разработаны пирометра следующих типов:

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

Пирометры излучения градуируются по АЧТ, поэтому при их применении в реальных условиях получают значения температур, в большинстве случаев отличающиеся от действительных и получившие название условных ($T_{\text{усл}}$). Для перехода от условной температуры к действительной, в показания пирометров вводятся соответствующие поправки. В зависимости от типа пирометра различаются температуры: радиационная, яркостная и цветовая.

Радиационной температурой реального тела T_p называют температуру, при которой полная мощность АЧТ равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре T_d . На основании данного определения, используя закон Стефана-Больцмана (5.3), получим

$$\sigma_0 T_p^4 = \varepsilon_\Sigma \sigma_0 T_d^4, \quad (5.4)$$

откуда

$$T_d = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon_\Sigma}.$$

Разность между действительной и радиационной температурами составит

$$\Delta T_p = T_d - T_p = T_p (\sqrt[4]{1/\varepsilon_\Sigma} - 1) \quad (5.5)$$

или

$$\Delta T_p = T_d (1 - \sqrt[4]{\varepsilon_\Sigma}).$$

Для реальных тел интегральная степень черноты $\varepsilon_\Sigma < 1$, поэтому из формулы (5.4) следует, что радиационная температура всегда меньше действительной температуры объекта измерения.

Яркостной температурой реального тела T_y называют температуру, при которой плотность потока спектрального излучения АЧТ равна плотности потока излучения реального тела для той же длины волны (или узкого интервала спектра) при действительной температуре T_d . Соотношение между данными температурами записывается в следующем виде

$$\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_d} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda} = a. \quad (5.6)$$

Так как $\varepsilon_\lambda < 1$, то яркостная температура всегда ниже действительной, причем они различаются сильнее при меньшем значении ε_λ и погрешность данного ПИ равна

$$\Delta T_y = T_y - T_d = -\frac{aT_y^2}{1 - aT_y} \quad \text{или} \quad \Delta T_y = T_d - T_y = -\frac{aT_d^2}{1 + aT_d}. \quad (5.7)$$

Цветовой температурой реального тела T_c называют температуру, при которой отношение плотностей потоков излучения АЧТ для двух

длин волн λ_1 и λ_2 равно отношению плотностей потоков излучения реального тела, для тех же длин волн при действительной температуре T_d . Связь между данными температурами записывается в виде следующего выражения

$$\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_{\text{ц}}} = \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1} / \varepsilon_{\lambda_2})}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} = b, \quad (5.8)$$

где ε_{λ_1} , ε_{λ_2} - спектральные степени черноты объекта при соответствующей длине волны.

Для физических объектов, у которых спектральная степень черноты возрастает с увеличением длины волны ($\varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_2}$) - $T_d > T_{\text{ц}}$. Для обратного случая: степень черноты уменьшается с увеличением длины волны ($\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_2}$) - $T_{\text{ц}} > T_d$. Погрешность ПСО равна

$$\Delta T_{\text{ц}} = T_{\text{ц}} - T_d = -\frac{b T_{\text{ц}}^2}{1 + b T_{\text{ц}}} \quad \text{или} \quad \Delta T_{\text{ц}} = T_d - T_{\text{ц}} = -\frac{b T_d^2}{1 - b T_d}. \quad (5.9)$$

Как следует из приведенных выше основных соотношений, методическая погрешность измерения температуры с помощью ПИ зависит от степени черноты объекта.

Принципиальная структурная схема устройства ПИ приведена на рисунке 5.2.

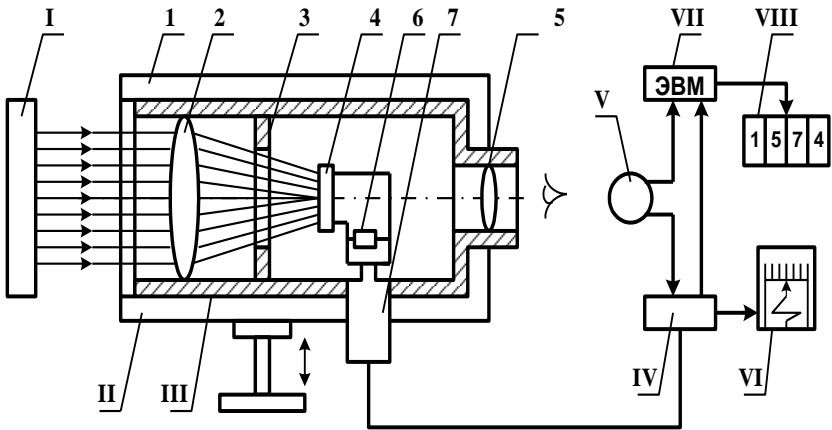


Рисунок 5.2 – Принципиальная схема устройства для бесконтактного измерения температуры
 1 – корпус; 2 – объектив; 3 – диафрагма; 4 – приемник излучения; 5 – окуляр; 6 – компенсатор температуры корпуса; 7 – штупцер

Электромагнитное излучение, характеризующее степень нагретости – действительную температуру T_d объекта контроля I поступает на первичный преобразователь II, который является датчиком температуры или, собственно, пирометром излучения. Корпус ПИ обычно устанавливается в специальной арматуре III, обеспечивающей его защиту от перегрева, механического повреждения и возможность наведения на объект измерения таким образом, чтобы приемник ПИ воспринимал только излучение объекта. Вторичный измерительный преобразователь IV предназначен для усиления и преобразования в выходной нормированный сигнал низкого уровня (напряжения или тока), развиваемого приемником излучения и пропорционально измеряемой температуре. Корректор V служит для ввода в измерительный преобразователь IV или микро-ЭВМ VII фактического значения величины интегральной или спектральной степени черноты объекта контроля. Измеренное значение температуры фиксируется с помощью самопишущего VI или цифрового VIII приборов. Микро-ЭВМ VII может заменить преобразователь IV либо обеспечить дополнительные функции: распечатку измеренных значений; хранение необходимых значений степени черноты функции от уровня измеряемых температур, типа объекта и спектральных характеристик; автоматический расчет корректирующих поправок на фоновое излучение кладки и т.п.

В ряде конструкций оптическая система ПИ выполняется в виде световодов: прямых или гибких, что позволяет уменьшить размеры пирометра и площадки визирования. Преимущества ПИ с гибкими стекловолоконистыми светодиодами: 1) отсутствие контакта с измеряемым объектом, что особенно важно при контроле температур движущихся объектов; 2) у измерительной схемы практически отсутствует инерционность, так как время срабатывания составляет $\sim 1,25$ мс; 3) сигнал устойчив по отношению к внешним воздействиям (индуктивному, механическому и т.п.); 4) аппаратура активно противостоит нагреву (до 1200 °С), давлению (~ 210 МПа), воздействию электрического поля и высокого напряжения, химическому воздействию агрессивных сред; 5) с помощью систем линз можно реализовать большой диапазон длин световодов (до 10 м) и снимать информацию с площадок объекта очень малых размеров, вплоть до $0,1$ мм; 6) возможность переноса лучистой энергии в 70 раз больше по сравнению с другими ПИ, что обеспечивает большую точность измерений и разрешающую способность аппаратуры.

Оптические пирометры. Принцип действия оптических пирометров основан на использовании зависимости плотности потока монохроматического излучения от температуры (закон Планка).

На рисунке 5.3 (а) представлена схема оптического пирометра с «исчезающей» нитью, принцип действия которого основан на сравнении яркостей объекта измерения и градуированного источника излучения в определенной длине волны.

Изображение излучателя 1 линзой 2 и диафрагмой 4 объектива пирометра фокусируется на плоскости нити накаливания лампы 5. Оператор через диафрагму 6, линзу 8 окуляра и красный светофильтр 7 на фоне рас-

каленного тела видит нить лампы. Перемещая движок реостата 11, оператор изменяет силу тока, проходящего через лампу, и добивается уравнивания яркости нити и яркости излучателя. Если яркость нити меньше яркости тела, то она на его фоне выглядит черной полоской (рисунок 5.3 а), при большей температуре нити, она будет выглядеть как светлая дуга на более темном фоне (рисунок 5.3 в). При равенстве яркостей излучателя и нити, последняя «исчезает» из поля зрения оператора (рисунок 5.3 б). Этот момент свидетельствует о равенстве яркостных температур объекта измерения и нити лампы. Питание лампы осуществляется с помощью батареи 10. Прибор 9, фиксирующий силу тока, протекающего в измерительной цепи, заранее проградуирован в значениях зависимости между силой тока и яркостной температурой, что позволяет производить считывание результата измерения в °С. Красный светофильтр 7 пропускает область с шириной около 0,01 мкм и с эффективной длиной волны 0,65 мкм.

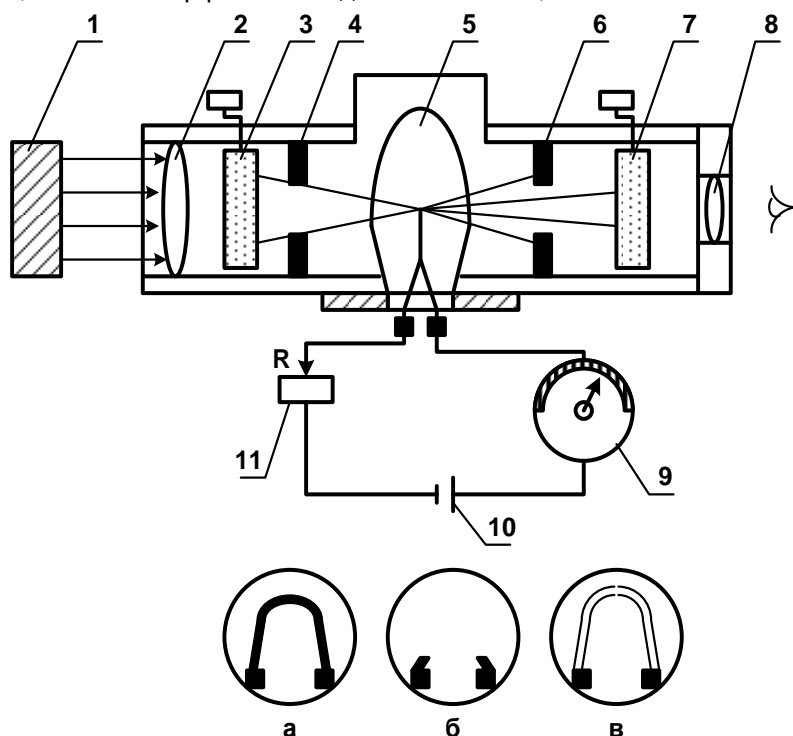


Рисунок 5.3 – Схема оптического пирометра с исчезающей нитью

В лампе накаливания применяется вольфрамовая нить, которая при высоких температурах начинает интенсивно испаряться. Поэтому для сохранения стабильной градуировки пирометра, осуществляют нагрев лампы только до яркостной температуры 1400-1500 °С, а при измерении более высоких температур яркость излучателя ослабляют с помощью поглощающего стекла 3, устанавливаемого между объектом и лампой.

Данный тип пирометров позволяет измерять температуры в широком интервале от 800 до 10000 °С. Для оптических пирометров промышленного применения в интервале температур 1200-2000 °С основная допустимая погрешность измерения составляет ± 20 °С. На точность измерения влияет неопределенность и изменяемость спектральной степени черноты, возможное изменение интенсивности излучения за счет ослабления в промежуточной среде, а также за счет отражения посторонних лучей. Максимальное расстояние до измеряемого объекта обычно ограничивают 5-6 м, минимальное – не менее 0,7 м.

3 Описание установки

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 5.4.

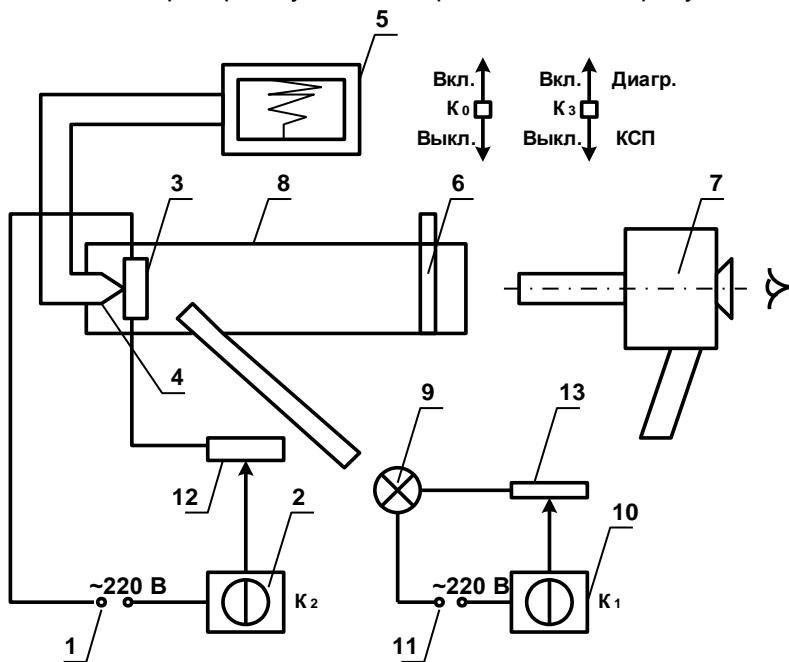


Рисунок 5.4 – Схема лабораторной установки

1 – источник питания; 2 – латр; 3 – пластинка или температурная рабочая лампа накаливания; 4 – термопара; 5 – потенциометр; 6 – затемненное стекло; 7 – оптический пирометр; 8 – камера; 9 – электролампочка; 10 – латр; 11 – источник питания электролампочки; (стенд включается тумблером K_0 ; диаграмма КСП-4 тумблером K_3); 12, 13 – реостаты

Схема установки включает: оптический пирометр; камеру с расположенным внутри ее исследуемым объектом (платиновая пластинка); термопару с вторичным регистрирующим прибором КСП-4; набор затемненных стекол, вставляемых между исследуемым объектом и объективом пирометра, при помощи которых имитируется различная степень загрязненно-

сти атмосферы; переключатель, обеспечивающий изменение температуры платиновой пластинки и электролампочку для дополнительного освещения платиновой пластины.

4 Порядок проведения работы

4.1. Поверка пирометра.

Выбрать из таблицы 5.1 вариант индивидуального задания.

Таблица 5.1 – Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Положение ручки реостата			Номер затемненного стекла	Степень накала лампочки K_2
	1	2	3		
1	1	2	3	I	1
2	1	3	2	II	2
3	2	1	3	III	3
4	2	3	1	I	3
5	3	1	2	II	2
6	3	2	1	III	1
7	1	3	2	I	1
8	2	3	1	II	2

Включить установку и латр 2, установить значения температуры, указанные в индивидуальном задании (температура задается положением движка реостата).

При каждом положении реостата 12 определить температуру пластинки при помощи термопары, а также произвести 5 независимых измерений с помощью пирометра.

Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

4.2. Определение влияния загрязненности атмосферы на показания оптического пирометра. При тех положениях реостата, что и в п. 4.1 произвести замеры температуры пластинки пирометром, поместив между пластинкой и объективом пирометра одно из затемненных стекол. Результаты измерений занести в таблицу 5.3.

4.3. Определение величины личной ошибки оператора, производящего замер.

При тех же температурах, что и по п. 4.1 произвести поочередно 5 независимых измерений. Измерения производятся каждым студентом, выполняющим работу. Результаты измерений занести в таблицу 5.4.

4.4. Определение влияния дополнительного освещения на показания пирометра.

При тех температурах, что и по п. 4.1 произвести поочередно 5 независимых измерений при включенной лампочке (степень накала пластины устанавливается в соответствии с индивидуальным заданием реостатом 13).

Таблица 5.2 – Результаты поверки пирометра

Положение реостата К1	Температура, измеренная с помощью термопары, °С	Яркостная температура (Тя), °С	Среднее значение яркостной температуры (Тя), °С	Среднеквадратичное отклонение яркостной температуры (σя)	Действительная температура пластинки (Тд), °С

Таблица 5.3 – Определение влияния загрязнения атмосферы на показания пирометра

Положение реостата К1	Номер затемненного стекла	Температура, измеренная с помощью термопары	Тя	σя	Тд

5 Обработка результатов измерений

5.1. Поверка пирометра.

Для каждого значения температуры пластинки рассчитать среднюю яркостную температуру и среднеквадратичное отклонение. Перевести яркостную температуру в действительную. Построить график поверки пирометра.

5.2. Определение влияния загрязненности атмосферы на показания пирометра.

Для каждой температуры пластинки рассчитать среднеарифметическую яркостную температуру и среднеквадратичное отклонение при замерах температуры пластинки через затемненное стекло. Считая, что при установке стекла длина волны излучения не изменяется, рассчитать действительную температуру по известной яркостной температуре и построить график зависимости действительной температуры (рассчитанной) от измеренной при помощи термопары. Определить величину систематической погрешности, возникающей за счет загрязнения атмосферы.

5.3. Определение величины личной ошибки оператора, производящего замер.

Для каждой температуры пластинки рассчитать среднюю арифметическую яркостную температуру и среднеквадратичное отклонение. Перевести яркостную температуру в действительную. Построить график зависимости температуры, определенной с помощью пирометра (Т_я) от действительной температуры, определенной с помощью термопары (Т_д). Сделать вывод о величине личной погрешности каждого оператора.

Таблица 5.4 – Определение личной погрешности наблюдателя

Положение реостата	Температура, измеренная с помощью термопары (Т), °С	Тя, °С			σТд	Тд, °С
		1	2	3		

Таблица 5.5 – Определение влияния дополнительного освещения на показания пирометра

Положение реостата	Степень накала лампочки К1			Тя, °С			σТд	Тд, °С
	1	2	3	1	2	3		

5.4. Определение влияния дополнительного освещения на показания пирометра

Для каждой из трех степеней подсветки и температур пластины рассчитать среднее арифметическое значение яркостной температуры и ее среднеквадратичное отклонение. Перевести яркостную температуру в действительную. Построить график зависимости $T_{я}-T_{д}$. Определить величину систематической погрешности, возникающей при попадании на изучаемый объект дополнительного освещения.

6 Требования к отчету

Отчет по работе должен включать: краткое теоретическое введение, описание лабораторной установки, схему пирометра, результаты экспериментов и их математической обработки.

7 Контрольные вопросы

1. Какие физические законы используются в пирометрии?
2. Какие типы пирометров существуют?
3. Что такое радиационная, яркостная и цветовая температуры?
4. Основные следствия из закона смещения Вина.
5. Что такое степень черноты?
6. Что такое серое тело?
7. Что является чувствительным элементом радиационного пирометра?
8. Зачем в оптическом пирометре используется красный светофильтр?
9. В чем преимущества оптических систем выполненных в виде световодов?

Лабораторная работа 6. Градуировка тензометрических весов

1 Цель работы

Выработать навыки измерения массы и силовых параметров с использованием тензометрических весов и устранить систематическую погрешность в результатах измерений.

2 Теоретическое введение

Характерной особенностью технологических процессов в металлургии является переработка значительных потоков материалов. Для правильного управления технологическим процессом, его автоматизации и учета материалов необходимо их достаточно точно взвешивать. Например, в доменном производстве взвешивают шихтовые материалы, в сталеплавильном – жидкий чугун, лом, легирующие добавки и т.д. При прокатке металла на станах важнейшими параметрами являются измерение усилий на валки, натяжение полосы проката, крутящие моменты и др.

Условия работы для измерения силовых параметров, как правило, тяжелые. Усилия, подлежащие измерению, достигают 30 МН. Измерения часто приходится проводить в условиях высоких температур, больших вибраций, запыленности и влажности, динамических нагрузках.

Для измерения массы, усилия, напряжения в большинстве случаев применяют датчики, работающие с тензометрическими (резисторными) и магнитоупругими (магнитоанизатропными) преобразователями.

Принцип работы таких датчиков основан на преобразовании усилия в упругую деформацию какого-либо элемента, воспринимающего силовой параметр и вторичном преобразовании напряженного состояния этого элемента в электрическую величину, которую можно непосредственно измерить. Используют упругие элементы, работающие в основном на сжатие, растяжение, реже на изгиб.

Чувствительным элементом тензорезистора (тензодатчика) является металлический проводник, наклеенный на массивную деталь, подвергающуюся механической деформации, и по изменению сопротивления тензорезистора в зависимости от приложенного усилия судят об измеряемом параметре.

На рисунке 6.1 показан проволочный тензодатчик, состоящий из проволоки диаметром 0,025-0,05 мм, уложенной в ряд петель длиной 5-25 и шириной 3-10 мм. Петли наклеивают на пленку или бумажную прокладку 2 и сверху заклеивают защитной бумажной полоской. Проволочный преобразователь наклеивают на поверхность 1, деформирующуюся под действием давления, таким образом, чтобы длина прямолинейной части петлевой обмотки, называемой базой, совпадала с основным направлением деформации. Деформация упругого элемента, испытывающего измеряемое усилие, вызывает соответствующее растяжение (сжатие) проволоки 3 тензорезистора. Сопротивление тензорезистора проводами 4 соединено с измери-

тельной схемой. При растяжении или сжатии детали происходит удлинение ($+\Delta l$) или укорочение ($-\Delta l$) наклеенного на ее поверхность проводника, что приводит к изменению сопротивления тензорезистора.

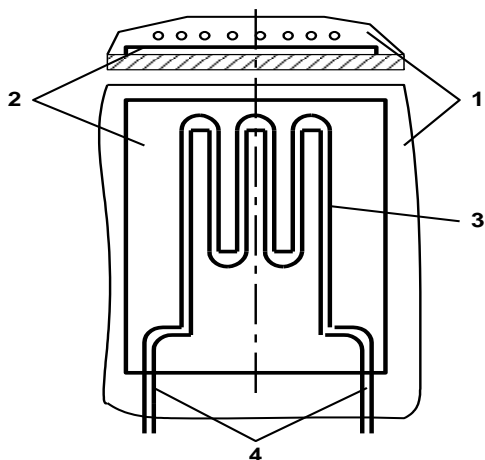


Рисунок 6.1 – Схема тензорезистора

Приращение электрического сопротивления выражается зависимостью

$$\Delta R/R = k(\Delta l/l), \quad (6.1)$$

где $\Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления преобразователя; $\Delta l/l$ – относительная деформация преобразователя; k – коэффициент тензочувствительности преобразователя.

Так как механическое напряжение σ связано с модулем упругости E материала и относительной деформацией соотношением

$$\sigma = E(\Delta l/l), \quad (6.2)$$

то уравнение преобразователя тензорезистора можно выразить

$$\Delta R/R = k(\sigma/E). \quad (6.3)$$

По найденному значению σ определяют геометрические размеры упругого элемента. Коэффициент k характеризует чувствительность тензорезистора к деформации: чем он больше, тем выше чувствительность преобразователя к деформации.

В металлах значение относительной деформации $\Delta l/l$ в пределах упругих деформаций не превышает $2,5 \cdot 10^{-3}$, что при значениях

$k = 0,5 \div 4$ приводит к весьма малым изменениям значения $\Delta R / R = (1,25 \div 10) \cdot 10^{-3}$. Таким образом, относительное изменение сопротивления преобразователей не превышает 1% при предельных напряжениях в металлах, в связи с чем сопротивление преобразователя не должно изменяться во времени или от влияния внешних факторов более чем на сотые доли процента. При столь малых рабочих изменениях сопротивления проволочного тензоэлемента особое значение имеет температурный коэффициент сопротивления проволоки. Наиболее подходящими материалами тензорезисторов являются сплавы: константан, манганин, нихром, хромель, имеющие малый температурный коэффициент сопротивления. В практике находят применение проволочные, фольговые, пленочные металлические преобразователи, а также преобразователи из монокристаллов полупроводников кремния, германия, арсенида галлия и др.

Ценным свойством полупроводниковых преобразователей является большое значение коэффициента тензочувствительности k ($-200 \div +850$) при очень малых базисах (до 2,5 мм). Для наклейки тензорезисторов к деталям применяют специальные клеи.

Тензорезисторы являются преобразователями разового действия, так как они наклеиваются на деталь и не могут быть сняты без повреждения.

При измерении силовых параметров, в комплекте с тензопреобразователями используют мостовые схемы. Предпочтение отдается схемам с дифференциальным включением преобразователей (рисунок 6.2), в которых один резистор (R_1) испытывает растяжение, а второй (R_2) сжатие.

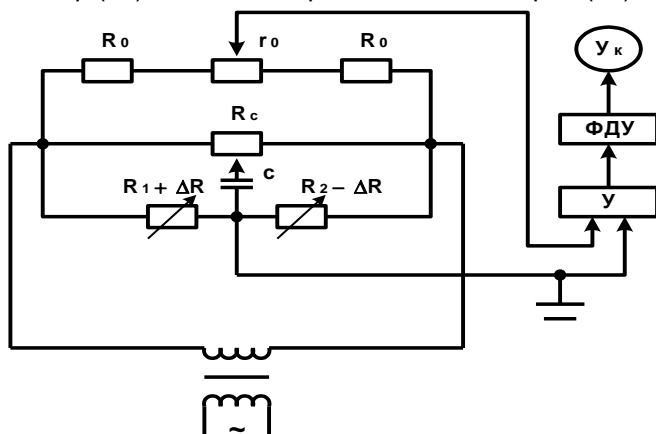


Рисунок 6.2 – Измерительная схема с тензорезисторными преобразователями

В этом случае исключается температурная погрешность и вдвое увеличивается чувствительность. В связи с тем, что при деформации относительное изменение сопротивления преобразователей $\Delta R / R$ невелико, мощность на измерительной диагонали моста, как правило, недостаточна для

работы выходного указателя, поэтому требуется ее усиление. Сигнал, снимаемый с диагонали моста, усиливается в усилителе У, проходит фазочувствительный демодулятор ФД и регистрируется выходным указателем Ук. Емкость С и сопротивление R_c служат для уравнивания моста перед началом работы по реактивной составляющей в связи с наличием паразитных емкостей и индуктивностей между проводом тензорезистора и металлическим объектом, а сопротивление r_0 – по активной. Для плавной регулировки моста необходимо, чтобы $r_0 \ll R_0$.

Простота конструкции и малые габариты позволяют использовать тензорезисторы в труднодоступных местах различных машин и механизмов.

3 Описание лабораторной установки

На рисунке 6.3 показана схема установки для градуировки тензометрических весов.

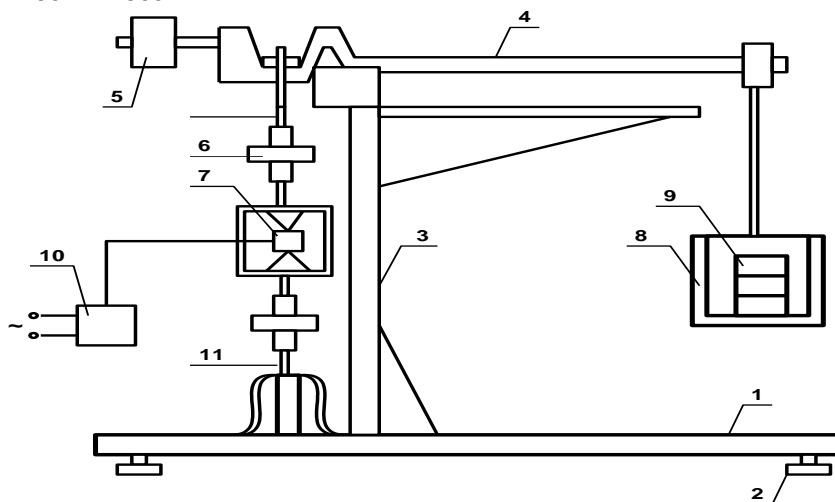


Рисунок 6.3 – Схема лабораторной установки

1 – станина; 2 – винты для установки уровня; 3 – стойка; 4 – коромысло; 5 – контроргруз; 6 – стяжной винт; 7 – тензорезистор; 8 – площадка для нагружения; 9 – гири; 10 – ВИП; 11 – тяги

4 Порядок проведения работы

1. Выставить стенд по уровню.
2. Включить преобразователь в сеть и подать на него напряжение.
3. Проверить правильность установки «0»
4. Выбрать индивидуальное задание в соответствии с вариантом (таблица 6.1).
5. Устанавливая последовательно на чашу весов гири, произвести измерения набором гирь и результаты занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.1 – Варианты индивидуальных заданий

№ варианта	Вес груза
1	0,1; 0,2; 0,5; 2,0; 10,0
2	0,1; 0,2; 0,2; 1,0; 10,0
3	0,1; 0,2; 0,5; 2,0; 20,0
4	0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 10,0
5	0,1; 0,2; 0,2; 2,0; 10,0
6	0,2; 0,2; 0,5; 2,0; 20,0
7	0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 10,0
8	0,1; 0,5; 2,0; 20,0; 10,0
9	0,1; 0,2; 1,0; 2,0; 10,0
10	0,1; 0,2; 0,5; 20,0; 10,0

Каждый замер провести не менее трех раз и определить средние значения.

5 Обработка результатов измерений

Таблица 6.2 – Результаты измерений и их обработка

Номер измерения	Масса гири, кг	Среднее показание прибора	Приведенная погрешность	Среднеквадратичное отклонение

6 Требования к отчету

Отчет должен содержать: краткое теоретическое введение, схему лабораторной установки, порядок проведения работы, полученные результаты и их анализ.

7 Контрольные вопросы

1. В чем заключается тензоэффект?
2. Где применяются тензорезисторы?
3. Чему равен коэффициент относительной тензоустойчивости для твердых и жидких материалов?
4. Что является чувствительным элементом тензорезистора?
5. Что является естественной выходной величиной тензорезистора, и чем она может быть измерена?
6. Зачем в опытной установке используются два тензорезистора?
7. Какие материалы используют для изготовления тензорезисторов?
8. Какие вторичные измерительные приборы используют для определения силовых параметров тензорезисторами?

Лабораторная работа 7. Измерение расхода газа различными методами

1 Цель работы

Ознакомиться с различными методами измерения расхода газа. Изучить методику измерения расхода газа методами: тахометрическим, постоянного и переменного перепада давлений.

2 Теоретическое введение

Классификация методов измерения расхода и количества

Приборы, измеряющие количество вещества, протекающее через поперечное сечение трубопровода за определенный промежуток времени, называют счетчиками количества. Количество вещества определяется в них разностью показаний счетчика в начале и конце этого промежутка времени.

Расходомерами называют приборы, определяющие количество вещества, протекающее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. Расход иногда определяют по показаниям счетчиков, как средний между двумя отсчетами. Имеются расходомеры со счетчиком, которые позволяют одновременно измерять расход и количество вещества.

Наиболее информативным является измерение массового расхода, так как объемный расход зависит от условий измерений и параметров измеряемой среды. Между объемными и массовыми величинами существует зависимость, определяемая соотношениями: $Q_M = \rho Q_V$, $Q_M = G_M/t$, $Q_V = G_V/t$, где t – интервал времени измерения; ρ – плотность измеряемой среды.

Сопоставимость результатов измерения расхода в условиях изменяющихся параметров среды обеспечивают приведением рабочих условий измерения к нормальным. В этом случае расход называют объемным расходом, приведенным к нормальным условиям. В промышленной практике нормальными условиями считаются температура $t_n = 20$ °С, давление $p_n = 101325$ Па и относительная влажность $\phi = 0$.

Общая классификация методов и средств измерения расхода и количества газов, жидкостей и пара, выполненная на основе учета их принципа действия следующая:

1. расходомеры переменного перепада давления, первичным преобразователем информации у которых является сужающее устройство;
2. расходомеры переменного уровня, принцип работы которых основан на зависимости уровня в расходомере, при свободном истечении среды через отверстие, от расхода;
3. расходомеры обтекания, основанные на зависимости положения чувствительного элемента, воспринимающего динамическое давление потока, от расхода;

4. тахометрические расходомеры, реализующие зависимость скорости движения чувствительного элемента расходомера, установленного в потоке от расхода. К ним относятся расходомеры: объемные (камерные) и измеряющие при движении определенные объемы среды (шестеренные, поршневые, роторные, винтовые, турбинные и шариковые);
5. электромагнитные расходомеры, реализующие зависимость взаимодействия электропроводной среды с магнитным полем от расхода;
6. тепловые расходомеры, преобразующие с помощью теплового преобразователя скорость потока в температуру и использующие зависимость этой температуры от расхода;
7. оптические расходомеры, принцип действия которых реализует зависимость скорости прохождения светового пучка от расхода среды;
8. меточные расходомеры реализуют зависимость времени прохода искусственно созданной внутри потока меткой участка трубопровода от расхода. В зависимости от способа введения метки в поток различают радиоактивные, ионизационные, химические, тепловые, магнитные, оптические, ядерно-магнитные и другие.

Тахометрический метод. В тахометрическом расходомере скорость движения чувствительного элемента, взаимодействующего с потоком, зависит от расхода вещества. Момент на подвижной части этих устройств создается за счет кинетической энергии самого измеряемого потока.

Скоростные счетчики. Измерители расхода этого типа применяют для измерения суммарного количества жидкости (в основном воды) при температурах до 90 °С и давлениях до 1-1,6 МПа. Их принцип действия основан на суммировании числа оборотов помещенного в поток вращающегося чувствительного элемента за определенный промежуток времени. В качестве рабочего элемента в скоростных счетчиках применяют вертикальные (аксиальные) или горизонтальные (тангенциальные) вертушки (турбинки). Частота вращения вертушки пропорциональна средней скорости потока, а следовательно, и объемному расходу. Число оборотов суммируется счетным механизмом, а количество жидкости в единицах объема указывается счетным устройством.

Погрешность счетчиков зависит в основном от вязкости, температуры и расхода среды и определяется экспериментально. Следует учесть, что потеря статического давления, вызываемого счетчиком, возрастает с увеличением расхода и вязкости и является критерием его пропускной способности.

Измерение расхода методом постоянного перепада давлений. Приборы данного типа используют для измерения расхода за счет перепада давления, возникающий при протекании среды через суженное сечение, причем площадь проходного сечения в них изменяется в соответствии с изменением расхода, а не остается постоянной. Постоянный перепад давления, возникающий в месте сужения, создается чувствительным элементом, изменяющим свое положение в потоке, и определяется, главным образом, весом этого элемента. Поток обтекает чувствительный элемент, и расходомеры постоянного перепада давления называют расходомерами

обтекания, к ним относят поплавковые, поршневые расходомеры и ротаметры (рисунок 7.1).

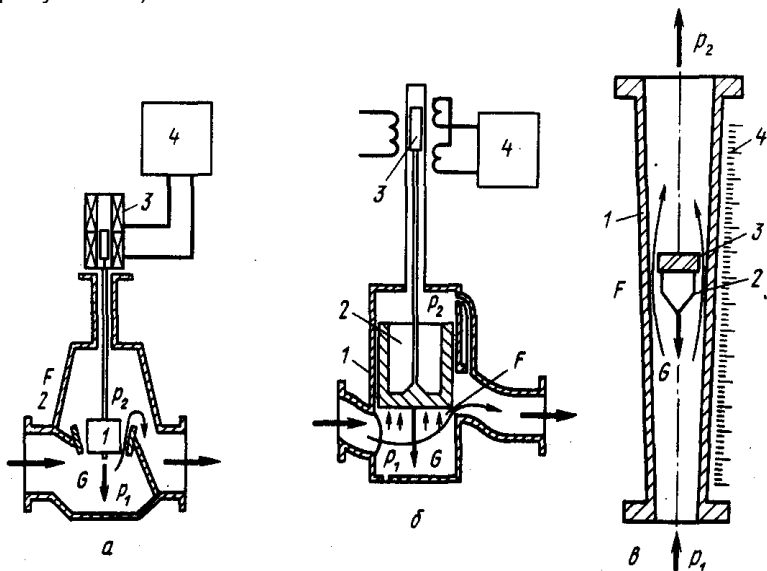


Рисунок 7.1 – Схемы расходомеров постоянного перепада давления

В поплавковом расходомере (рисунок 7.1 а) чувствительный элемент выполнен в виде поплавка 1, свободно перемещаемого потоком в вертикальном направлении относительно конического седла 2, диаметр и длина которого примерно одинаковые. Подъем поплавка увеличивает площадь проходного сечения F и, следовательно, количество протекающей среды. Высота подъема определяется моментом равновесия противоположно действующих на поплавок сил: тяжести, подъемной силы и трения на стенках. При равенстве этих сил поплавок останавливается, величина подъема фиксируется преобразователем 3 и передается на регистрирующий прибор 4.

В поршневом расходомере (рисунок 7.1 б) поток свободно входит под давлением p_1 под поршень 2, установленный в корпусе 1, поднимает его и уходит через прямоугольное отверстие F , перекрываемое поршнем. Прямоугольная форма выходного отверстия позволяет получить линейную зависимость величины расхода от высоты подъема поршня. Подъем и условия равновесия поршня определяются равенством сил тяжести поршня G и подъемной силы

$$G = g \cdot M = (p_1 - p_2) \cdot F, \quad (7.1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; M – масса поршня и движущихся с ним частей, кг; $\Delta p = p_1 - p_2$ – перепад давлений до и после поршня, Па; F – площадь поршня, м².

Уравнение показывает, что перепад давлений на этих устройствах в момент равновесия остается постоянным при любом расходе

$$\Delta p = p_1 - p_2 = gG/F = \text{const.} \quad (7.2)$$

Расходомеры этого типа имеют условный диаметр проходного сечения – 50 мм и позволяют измерять расходы вязких жидкостей (60–85 сСт) при давлении не более 1,6 МПа и температуре до 100 °С. Пределы измерения могут быть расширены от 0,5 до 4,0 м изменением массы грузов 3, погрешность измерения не превышает 2,5 %.

Ротаметр является самым распространенным прибором постоянно перепада давления (рисунок 7.1 в). Он состоит из длинной вертикально расположенной и расширяющейся вверх конусной трубки 1, внутри которой свободно плавает поплавков 2, изготавливаемый, в зависимости от пределов измерения, из различных материалов (стали, эбонита, дюралюминия, фторопласта). Центрирование положения поплавка внутри потока достигается применением специальной винтовой насечки 3 на ободке поплавка. Под действием движущегося потока поплавков перемещается в вертикальном направлении и одновременно вращается вокруг своей оси, что и обеспечивает его центрирование в середине потока. Положение поплавка внутри корпуса однозначно связано с расходом и может быть определено непосредственно по шкале 4, нанесенной на корпусе (стеклянный ротаметр), или передается с помощью пневматического или электрического преобразователя на вторичный измерительный прибор.

На рисунке 7.2 показана схема действия сил, удерживающих поплавков в положении равновесия.

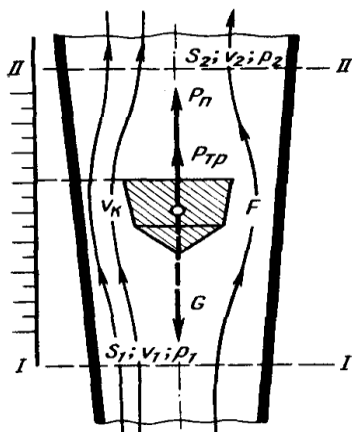


Рисунок 7.2 – Схема работы расходомера постоянного перепада давления

Поток, протекающий снизу вверх в конусной трубке, обтекая поплавок, поднимает его до тех пор, пока площадь кольцевого сечения F между поплавком и внутренней поверхностью трубки не достигнет такого значе-

ния, когда действующая на поплавков сила тяжести $G_n = g\rho_n V_n$ (V_n – объем поплавка, м^3 , ρ_n – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, g – ускорение свободного падения) не уравновесится силами, действующими снизу на поплавков, а именно, подъемной силой P_n , силой трения $P_{\text{тр}}$, возникающей на боковой поверхности поплавка.

Подъемная сила создается за счет разности действующих на поплавков снизу и сверху статических давлений $\Delta p = p'_1 - p'_2$ и определяется как $P_n = \Delta p_1 S$, где S – наибольшая площадь поперечного сечения поплавка, м^2 .

Сила трения равна $P_{\text{тр}} = \lambda u_k S_{\text{бок}}$, где λ – коэффициент трения, зависящий от числа Re и шероховатости поплавка; u_k – средняя скорость потока в кольцевом зазоре между корпусом и поплавком, $\text{м}/\text{с}$; $S_{\text{бок}}$ – боковая поверхность поплавка, м^2 . Поэтому перепад давления – величина постоянная и не зависит от расхода.

$$\Delta p_1 = \frac{g\rho_n V_n - \lambda u_k S_{\text{бок}}}{S} = \text{const}$$

С увеличением расхода сила, действующая на поплавков снизу, возрастает, что вызывает подъем поплавка, а следовательно, увеличение кольцевого зазора между поплавком и стенками корпуса. В результате перепад давления достигает прежней постоянной величины.

Формула расхода для ротаметров выражается сложной зависимостью, определяемой большим количеством параметров

$$Q_V = \alpha F \sqrt{2gV_n(\rho_n - \rho)/(\rho S)}, \quad (7.3)$$

где α – коэффициент расхода, зависящий от множества факторов – величины конусности трубки, неравномерности распределения скоростей в кольцевом зазоре при обтекании поплавка, потери на местные сопротивления внутри прибора, трения на поплавке и его геометрической формы и размеров, а также ряда других параметров; α – коэффициент расхода ($\alpha = 2 / \kappa_n$); g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; V_n – объем поплавка, м^3 ; ρ_n и ρ – плотность материала поплавка и протекающей среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; κ_n – коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от числа Рейнольдса, шероховатости, геометрических размеров и высоты его подъема.

На практике ротаметры градуируются экспериментально по воде или воздуху, а соответствующие градуировочные характеристики приводятся в паспорте прибора.

Изменение температуры изменяет плотность среды и ее вязкость, поэтому вводится поправочный коэффициент

$$k = (\alpha_1 / \alpha_2) \cdot \sqrt{(\rho_n - \rho)(\rho_n - \rho_1)\rho}. \quad (7.4)$$

где α_1 и ρ_1 – коэффициент расхода и плотность среды, соответствующая градуировочным условиям; α и ρ – действующие значения коэффициента расхода и плотности.

В случае малой вязкости среды и слабой зависимости α_1 от температуры и давления поправочный коэффициент может быть упрощен

$$k = \sqrt{(\rho_{\text{п}} - \rho)\rho_1 / (\rho_{\text{п}} - \rho_1)\rho}. \quad (7.5)$$

Изменение пределов измерения ротаметров осуществляется изменением массы поплавка без изменения его формы и размеров. Расчет ведут, исходя из критерия $(u^2\rho)/M_{\text{п}} = \text{const}$, откуда

$$M_{\text{п}2} = M_{\text{п}1} (u_2^2 / u_1^2)(\rho_2 / \rho_1), \quad (7.6)$$

где $M_{\text{п}1}$ – масса поплавка, градуированного на среду с вязкостью u_1 и плотностью ρ_1 ; $M_{\text{п}2}$ – масса поплавка для измерения среды с вязкостью u_2 и плотностью ρ_2 .

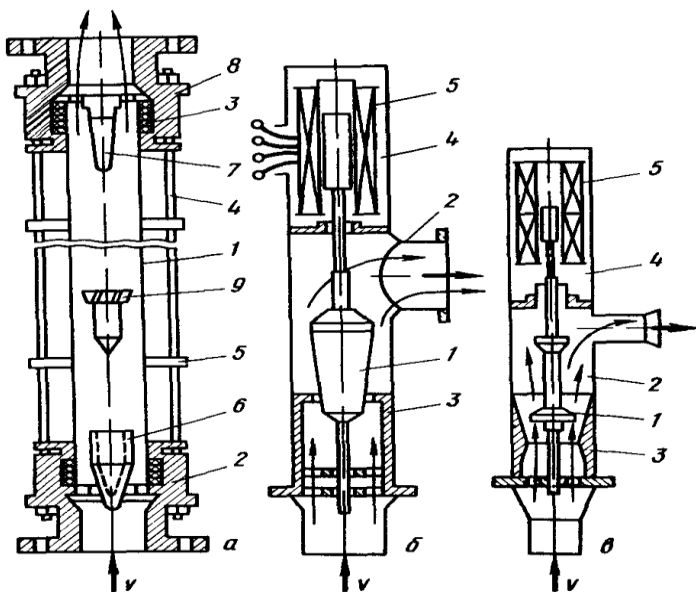


Рисунок 7.3 – Типовые схемы ротаметров

а – с конической стеклянной трубкой; б – с коническим поплавком; в – с грибовидным поплавком

Существует несколько разновидностей конструктивного исполнения ротаметров. Для местного измерения прозрачных жидкостей и газов применяют ротаметр со стеклянной конусной трубкой 1 (рисунок 7.3 а), которая зажимается концевыми фланцами 2 и 3 с сальниковым уплотнением 8, тягами 4 и распорными перегородками 5. Внутри трубки установлены ограни-

чители хода поплавка 6 и 7. Поплавок 9 имеет винтовую насечку; верхняя грань поплавка служит указателем отсчета шкалы, которая наносится непосредственно на поверхность стеклянной трубки в процентах. Пределы измерения таких ротаметров по воздуху от 0,063 до 40 м³/ч, по воде от 0,0025 до 2,5 м³/ч при наибольшем избыточном давлении до 0,6 МПа и температуре от –30 до +100 °С. Класс точности 2,5-4,0, диаметр условного прохода 3-40 мм.

Ротаметр с электрической дистанционной системой передачи показаний с коническим поплавком 1 (рисунок 7.3 б) имеет металлический корпус 2 с диафрагмой 3. Поплавок через тягу связан с сердечником 4 передающего дифференциально-трансформаторного преобразователя 5, выходной сигнал которого, используется в схемах контроля и управления.

В ротаметре с грибообразным поплавком 1 (рисунок 7.3 в) внутри металлического корпуса 2 устанавливается конусообразная вставка 3, относительно которой и происходит перемещение поплавка. Через тягу 4 это перемещение передается на систему дистанционного измерения, например преобразователь 5.

Ротаметры последних двух типов выпускаются на повышенные давления до 6,4 МПа и расходом по воде от 0,025 до 16 м³/ч и могут измерять загрязненные и непрозрачные среды при температурах до 70 °С. Потери давления на расходомерах постоянного перепада давления не превышают 0,01 МПа для жидкостей и 0,005 МПа для газов, диаметр условного прохода от 6 до 100 мм. Предельная погрешность градуировки составляет 0,2-0,3 % при среднем квадратическом отклонении результатов 0,18 %.

Проверка ротаметров состоит из трех операций (внешнего осмотра, установления работоспособности и определения метрологических характеристик) и проводится на установке, имеющей погрешность, не превышающую 1/3 погрешности ротаметра. Проверка должна проводиться на воде или воздухе с температурой (20±5) °С при температуре окружающей среды (20 ±2) °С для класса точности 1,0 или (20±5) °С при классе прибора 1,5; 2,5; 4,0.

Измерение расхода методом переменного перепада давления. Одним из наиболее распространенных и широко применяемых непрерывных методов измерения расхода является метод переменного перепада давления. Он основан на дросселировании, (т.е. сужении, потока вещества, движущегося по трубопроводу, которое приводит к возрастанию средней скорости потока, и, следовательно, к увеличению ее кинетической энергии и уменьшению потенциальной, согласно закону сохранения энергии. Соответственно статическое давление в месте сужения уменьшается и возникает разность (перепад) давлений потока до сужения и в суженном сечении. Величина перепада зависит от скорости среды через суженный участок трубопровода, т.е. от расхода среды через него.

В круглом трубопроводе I имеется дросселирующее устройство, в месте сужения происходит изменение характера движения среды и статического давления вдоль стенки трубопровода (рисунок 7.4).

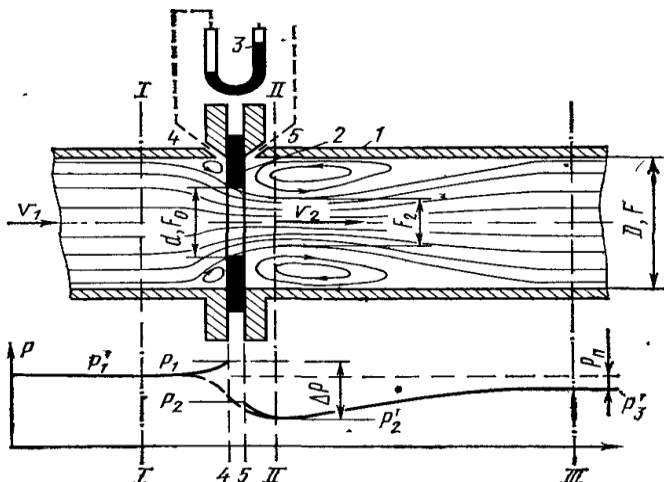


Рисунок 7.4 – Характер движения среды и распределения статического давления в месте установки сужающего устройства

При протекании вещества через диафрагму поток изменяет свое поперечное сечение и скорость. Поток, движущийся по трубопроводу со скоростью u_1 , сужается от полного сечения F трубопровода (сечение I–I) до сечения отверстия дросселирующего устройства F_0 и вследствие инерции струи до максимального сужения F_2 в сечении II–II. Соответственно средняя скорость u_1 возрастает до максимального значения u_2 в месте наибольшего сужения струи, которое наблюдается благодаря инерции струи на некотором расстоянии от дросселирующего устройства. Кинетическая энергия потока в этом месте увеличивается, а потенциальная соответственно уменьшается, увеличивается динамическое давление потока и уменьшается статическое давление от P_1 до P_2 . Перепад статического давления $\Delta P = P_1 - P_2$ (отбираются до и после сужающего устройства и измеряются дифференциальным манометром 3 через отборные отверстия 4 и 5) зависит от скорости потока и плотности ρ движущегося вещества. При неизменной плотности потока ΔP может служить мерой скорости потока, по которой можно определить расход Q

$$Q = V_{cp} F. \quad (7.7)$$

По мере удаления от сужающего устройства сечение струи увеличивается до первоначального значения F , скорость уменьшается и становится равной первоначальной скорости u_1 . Статическое давление также повышается, но не достигает первоначального значения вследствие потери части энергии на трение и образования вихрей в месте установки дросселирующего устройства. Разность давлений в углах за диафрагмой приводит к образованию «мертвых зон», в которых возникает обратное движение среды, так называемый вторичный поток, взаимодействие которого с основным приводит к появлению вихрей. На образование их тратится часть

энергии потока, а следовательно, наблюдается потеря давления, выражаемая разностью статических давлений $P_n = P_1' - P_3'$, которую называют безвозвратной потерей давления (P_3' – статическое давление в сечении III–III, где струя вновь полностью заполняет сечение трубы). Она зависит от профиля сужающего устройства и отношения площадей сечения F_0 к полному сечению трубопровода F , называемого модулем сужающего устройства

$$m = F/F_0 = d^2/D^2. \quad (7.8)$$

Зависимость расхода от перепада давления выводится из совместного решения уравнений Бернулли $P_1' + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} = P_2' + \frac{\rho_2 v_2^2}{2}$ и неразрывности струи $v_1 F = v_2 F_2$, записанных для сечений I–I и II–II относительно скорости потока v_2 в месте наименьшего сужения струи для идеальной жидкости $\rho = \text{const}$. Тогда уравнение для объемного расхода примет вид

$$Q_0 = v_2 F_2 = \frac{\mu \xi}{\sqrt{1 - \mu_2 m_2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (7.9)$$

где множитель $\alpha = \frac{\mu \xi}{\sqrt{1 - \mu_2 m_2}}$ – называют коэффициентом расхода.

Практически давление после сужающего устройства отбирается на некотором расстоянии от боковой поверхности сужающего устройства и, следовательно, поток несколько расширяется, его плотность уменьшается, что особенно важно при измерении сжимаемых сред (газов, пара). Это обстоятельство учитывается введением поправочного множителя ϵ на расширение измеряемой среды. В окончательном виде уравнения объемного и массового расходов примут вид

$$Q_0 = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}, \quad (7.10)$$

$$Q_M = \rho Q_0 = \alpha \epsilon F_0 \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)}. \quad (7.11)$$

Для практических расчетов чаще осуществляют измерение объемного и массового расхода в м^3 или кг в час, а площадь F_0 выражают через диаметр трубопровода в мм. В этом случае расход выражается общей формулой вида

$$Q_0 = A \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho}}, \quad (7.12)$$

$$Q_M = A \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\rho (P_1 - P_2)}. \quad (7.13)$$

где A – числовой коэффициент, зависящий от системы единиц, принятых для измерения давления. Если перепад давления измеряется в Па, кгс/м³ или кгс/см³, численные значения коэффициента A соответственно будут $3,998 \cdot 10^{-3}$, $1,252 \cdot 10^{-2}$ и $1,252$.

3 Описание установки

На рисунке 7.5 представлена схема лабораторной установки для измерения расхода следующими методами: тахометрическим, постоянного и переменного перепада давлений.

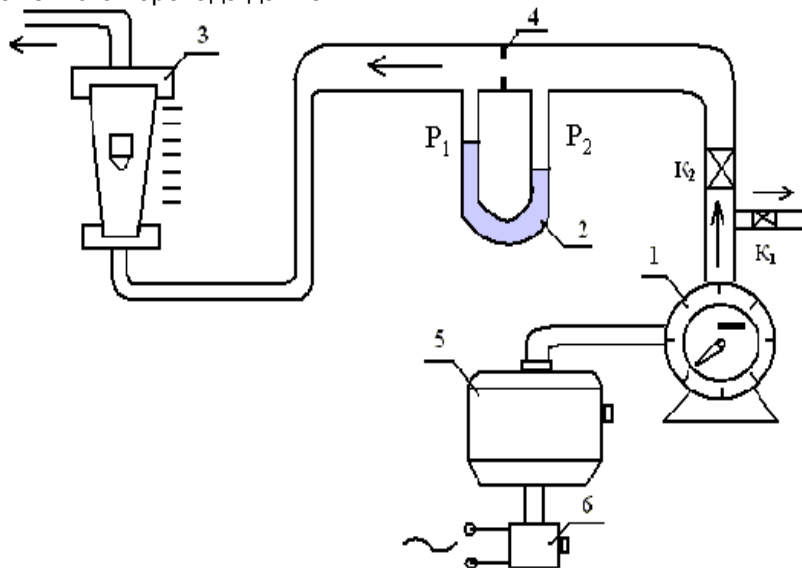


Рисунок 7.5 – Схема лабораторной установки

1 – газосчетчик барабанный с жидкостным затвором ГСБ-400; 2 – дифференциальный манометр; 3 – ротаметр; 4 – диафрагма; 5 – компрессор; 6 – реостат

4 Порядок проведения работы

4.1. Проверить герметичность установки.

4.2. Снять показания с газового счетчика при различных режимах работы компрессора: 50, 100, 150, 200, 220 В. Для этого необходимо закрыть кран K_2 и открыть K_1 . Для каждого режима произвести не менее пяти замеров. Результаты измерений занести в таблицу 7.1.

4.3. Отградуировать сужающее устройство и ротаметр по газосчетчику.

Для этого закрыть кран K_1 и открыть K_2 . За стеклянной трубкой ротаметра закрепить бумажную полоску и нанести значения в зависимости от положения поплавка.

Параллельно с этими действиями записать показания давления на входе и выходе сужающего устройства.

Все измерения произвести для трех режимов работы компрессора и не менее пяти раз. Результаты измерений занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.1 – Результаты измерения расхода тахометрическим методом

Напряжение, В	№ замера	Показания газосчетчика
100	1...5	
150	1...5	
200	1...5	
220	1...5	

Таблица 7.2 – Результаты измерения расхода методами: тахометрическим, постоянного и переменного перепада давления

Напряжение, В	№ замера	Показания газосчетчика, л/с	Показания ротаметра, л/с	Показания СУ – перепад давлений на диафрагме, Па
100	1...5			
150	1...5			
200	1...5			
220	1...5			

5 Обработка результатов измерений

5.1. По данным таблицы 7.1 определить средний расход газа, относительную и приведенную погрешности при измерении расхода тахометрическим методом. Результаты расчета занести в таблицу 7.3.

5.2. По данным таблицы 7.2 определить средний расход газа, относительную и приведенную погрешности при измерении расхода методами постоянного и переменного перепада давлений. Результаты расчета занести в таблицу 7.4.

Таблица 7.3 – Результаты расчета среднего расхода и погрешностей для тахометрического метода

Напряжение, В	Средний расход газа, м ³ /с	Относительная погрешность		Приведенная погрешность	
		средняя	общая	средняя	общая
100					
150					
200					
220					

Таблица 7.4 – Результаты расчета среднего расхода и погрешностей для методов постоянного и переменного перепада давления

Напряж ние, В	Метод постоянного перепада давления					Метод переменного перепада давления				
	Относитель- ная погреш- ность		Приведен- ная по- грешность		Сред- ний рас- ход, м ³ /с	Относитель- ная погреш- ность		Приведенная погрешность		Сре- дний рас- ход, м ³ /с
	сред- ний	об- щий	сред- ний	об- щий		сред- ний	об- щий	сред- ний	об- щий	
100										
150										
200										
220										

6 Требования к отчету

Отчет должен содержать наименование и цель работы, теоретическую часть, схему установки и ее краткое описание, результаты работы в виде таблиц, выводы, в которых необходимо отразить точность и надежность каждого из методов измерения расхода.

7 Контрольные вопросы

1. В чем отличие счетчиков количества от расходомеров?
2. Как классифицируются методы и средства измерения расхода и количества?
3. По какому принципу действуют скоростные счетчики измерения расхода и от чего зависит их погрешность?
4. По какому принципу работают расходомеры постоянного перепада давления?
5. В каких единицах градуируются шкалы расходомеров постоянного перепада давления?
6. Какие существуют конструктивные разновидности ротаметров?
7. Какие единицы приняты для расхода в системе СИ?
8. Как проводится поверка ротаметров?
9. По какому принципу работают расходомеры переменного перепада давления?
10. Что такое модуль сужающего устройства?
11. От каких факторов зависит коэффициент расхода?
12. Что такое «мертвые» зоны?

Лабораторная работа 8. Измерение уровня

1 Цель работы

Ознакомиться и изучить особенности измерения уровня сыпучих материалов зондовым методом. Произвести градуировку комплекта.

2 Теоретическое введение

Контроль за уровнем жидкости и сыпучих тел имеет большое значение в технике, особенно, при обслуживании агрегатов с непрерывной подачей и отбором вещества. К таким агрегатам в металлургии относятся доменные печи, машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), барабаны паровых котлов-утилизаторов и т.д. Уровень вещества в таких агрегатах должен поддерживаться в заданных пределах. Например, в доменной печи уровень и профиль поверхности шихтовых материалов влияют на распределение газового потока в печи, а, следовательно, и на весь ход доменной плавки и ее технико-экономические показатели.

Для измерения уровня жидкостей применяют датчики следующих типов: поплавковые (буйковые), манометрические, емкостные, акустические и радиоизотопные.

Простейшими уровнемерами, применяемыми для контроля уровня жидкости, находящейся в резервуаре под атмосферным давлением, являются поплавковые уровнемеры, схема которых показана на рисунке 8.1 (а). Чувствительным элементом измерителя уровня является поплавок 1, плавающий на поверхности жидкости 2. Положением поплавка, а, следовательно, и положением связанного с ним уравновешивающего груза 3 относительно шкалы 4, определяется уровень жидкости.

Поплавок в большинстве случаев представляет собой металлический или стеклянный пустотелый или заполненный каким-либо легким материалом герметичный сосуд шаровидной, цилиндрической или чечевицеобразной формы. Чаще применяются тонущие поплавки-буйки частично погруженные в жидкость (рисунок 8.1 б). Буюк 5 подвешен на рычаге 6 и пружине 7. При изменении уровня жидкости изменяется степень погружения буйка, а, следовательно, и растягивающее усиление пружины 7 под действием веса буйка. Благодаря этому, каждому уровню будет соответствовать определенное положение буйка.

Положение буйка или поплавок преобразуется в линейное или угловое перемещение, которое может быть передано на показывающий прибор или преобразовано в электрический или пневматический сигнал для дистанционной передачи. Перемещение буйка через рычаг 6 передается на ось 8, на которой закреплена стрелка 9, показывающая по шкале 10 уровень жидкости.

Для измерения уровня жидкости в барабанах парогенераторов, котлов-утилизаторов и системах испарительного охлаждения металлургиче-

ских печей широко применяют мембранные дифманометры, которые отградуированы в единицах уровня.

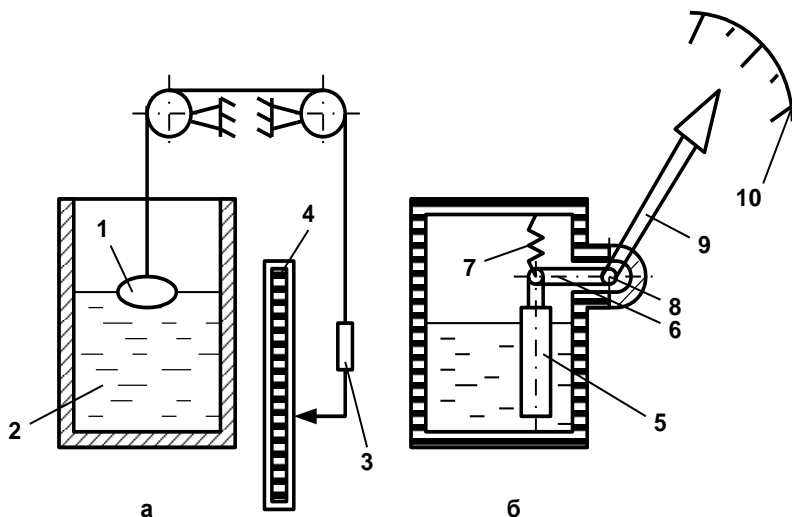


Рисунок 8.1 – Схемы устройства механических уровнемеров
 а – поплавковый; б – буйковый

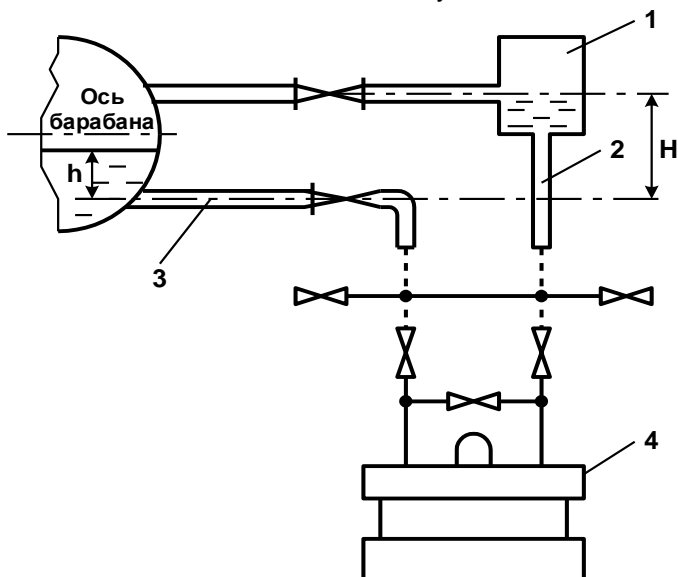


Рисунок 8.2 – Схема измерения уровня воды в барабане дифференциальным манометром с использованием уравнивающего сосуда

На рисунке 8.2 показана схема измерения уровня воды в баке дифманометром с использованием уравнивающего сосуда. Plusовая камера дифманометра 4 соединена трубкой 2 с уравнивающим сосудом 1, а минус-

совая камера соединена с нижней частью водяного пространства барабана трубкой 3. В сосуде 1, присоединенном к паровому пространству барабана, уровень воды (конденсата) поддерживается постоянным. Дифманометры показывают разность гидростатических давлений измеряемого и уравнительного (с постоянным уровнем) сосудов. При измерении уровня в открытых сосудах можно не применять уравнительных сосудов, а просто измерять уровень по показаниям манометра

Емкостные уровнемеры применяют для измерения уровня жидкости с переменной плотностью.

Определение уровня сыпучих сред – более сложная задача, чем контроль уровня жидких веществ. Это связано с тем, что сыпучие материалы при заполнении и опорожнении емкостей не имеют горизонтальной поверхности, а образует откосы в результате трения и некоторого сцепления между частицами сыпучего продукта. Давление сыпучих сред на дно и стенки емкости непропорционально высоте уровня загрузки, т.е. на сыпучие материалы не распространяется закон Паскаля. Большинство сыпучих материалов при хранении теряет сыпучесть, т.е. обладают свойством слеживаемости. Установлены два вида слеживаемости сыпучих тел: физико-механическое и физико-химическое. Слеживаемость первого вида связана с возникновением сил трения между частицами в результате упругого молекулярного и электростатического взаимодействия, а также капиллярных и других сил. Слеживаемостью этого вида обладает зерно, цемент и другие материалы. Слеживаемость второго рода обуславливается физико-химическими процессами, которые могут приводить к соединению частиц и образованию монолитного твердого тела. Такую слеживаемость могут иметь поваренная и калийная соль, сахар и аналогичные им материалы. Существенное влияние на слеживаемость оказывает влага. Сыпучие продукты могут прилипнуть к поверхностям емкостей и чувствительным элементам приборов контроля и регулирования уровня.

В сочетании со слеживаемостью сыпучих продуктов налипание на вертикальных стенах приводит к зависанию материалов. Как правило сыпучие материалы имеют высокую абразивность (зола, песок, боксит, железная руда и др.).

Таким образом, сыпучие материалы, уровни которых контролируются, обладают разнообразными физическими и химическими свойствами: различным размером частиц (пылевидные, порошкообразные и кусковые), плотностью и объемной массой, липкостью, абразивностью, слеживаемостью, углами откоса свободной поверхности при насыпании и при обрушении, электропроводностью, влажностью, сыпучестью, взрывоопасностью, смерзаемостью, температурой и др. Контроль уровня может осуществляться при различных условиях: давлении, температуре, влажности, количестве материала. Все это обуславливает большое разнообразие серийно выпускаемых промышленностью приборов для контроля и регулирования уровня сыпучих сред основанных на различных принципах работы и условиях эксплуатации.

Классификация методов измерения сыпучих материалов.

Приборы, применяемые для контроля уровня сыпучих материалов можно классифицировать по следующим признакам: по характеру работы (контактные, бесконтактные), исполнению (общепромышленные, взрывоопасные и др.), виду выполняемых функций (реле или сигнализатор уровня, регулятор, уровнемер), принципу работы, способу контроля (порционные или дискретные и непрерывные).

Уровнемеры для сыпучих материалов классифицируются в зависимости от физических свойств и принципа действия:

- плотности (весовой, поплавковый, буйковый, гидростатический, радиоизотопный);
- механические (с гибким щупом, маятниковый, зондовый, с вращающимся и колеблющимся телами);
- электромагнитные (индуктивный, емкостной, кондуктометрический, радиоволновый);
- тепловые (дилатометрический терморезисторный, термоэ.д.с.);
- оптические (фотоэлектрический, визуальный, преломления, поглощения, отражения);
- акустические (локационный, диссипативный, резонансный).

3 Описание установки

Уровнемеры с поступательным движением чувствительного элемента называют зондовыми. Схема лабораторной установки представлена на рисунке 8.3.

Массивное тело 1 подвешено внутри сосуда с сыпучим материалом 2 на гибкой связи 3 (тросе или ленте). На валу реверсивного двигателя РД закреплен барабан наматывающий трос с грузом. Двигатель подключен таким образом, что при ослабленном тросе (груз касается сыпучего материала) двигатель наматывает трос и начинает поднимать груз. В момент натяжения троса через коромысло 4 срабатывают контакты SL и двигатель РД ослабляет трос. В дальнейшем цикл повторяется. Таким образом, груз будет постоянно находиться на поверхности сыпучего материала. Двигатель РД связан кинематически с индикатором угла поворота ИУФ ферродинамического преобразователя, сигнал с которого поступает на вторичный самопишущий прибор 9, шкала которого отградуирована в единицах измерения уровня сыпучего материала.

4 Порядок проведения работы.

4.1. Ознакомиться с принципом действия и устройством зондового следящего уровнемера.

4.2. Включить установку, установив тумблер в положение «Вкл».

4.3. Включить прибор ВФС для чего переключать «питание» в положение «Вкл». Выдержать в три минуты.

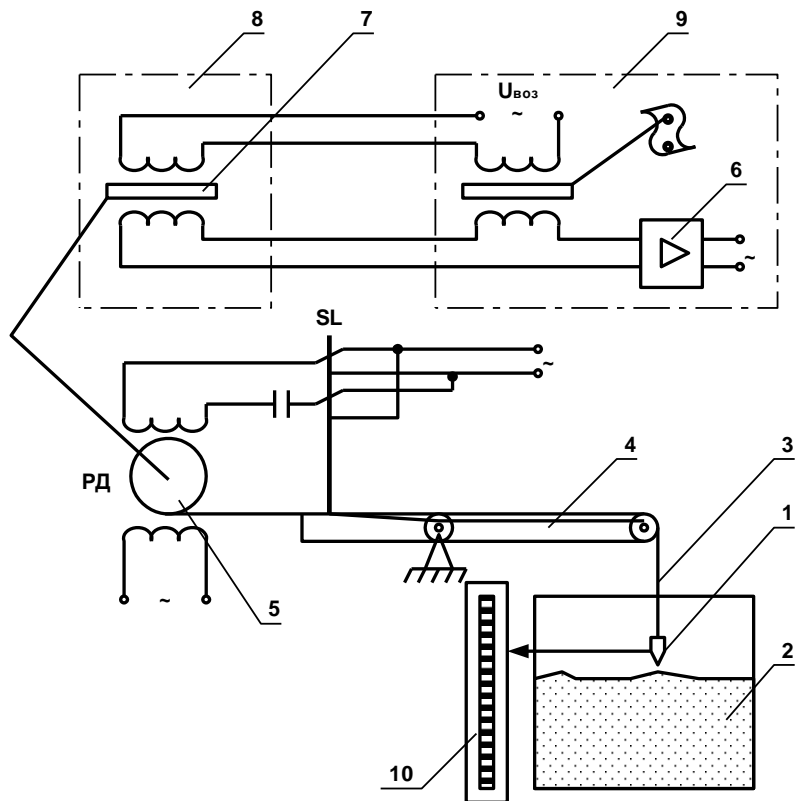


Рисунок 8.3 – Схема лабораторной установки для измерения уровня сыпучих материалов

1 – груз; 2 – сыпучий материал; 3 – трос; 4 – коромысло; 5 – реверсивный двигатель; 6 – электронный усилитель; 7 – подвижный сердечник; 8 – первичный преобразователь; 9 – ВИП, 10 – шкала механического прибора

4.4. Установить переключатель «проверка» вторичного прибора ВФС в положения «Контроль». Стрелка прибора должна установиться на середину шкалы при исправном приборе.

4.5. Перемещая емкость с сыпучим материалом, записать показания прибора ВФС для разных уровней сыпучего материала. После каждого перемещения произвести не менее трех измерений и определить среднее значение. Результаты измерений занести в таблицу 8.1.

4.6. Определить абсолютную и относительную погрешность по формулам:

$$a = N_1 - N_2 - \text{абсолютная погрешность,}$$

где N_1 и N_2 – соответственно показания уровня по шкале и на вторичном измерительном приборе.

$$\delta = \frac{|a|}{H_{1К} - H_{1Н}} \cdot 100 \text{ – приведенная погрешность.}$$

Таблица 8.1 – Результаты измерений и расчетов

Экспериментальные данные		Расчетные	
Показания уровня по шкале H_1 , мм	Показания вторичного прибора ВФС H_2 , мм	Абсолютная погрешность a , мм	Приведенная погрешность δ , %

5 Обработка результатов измерений

5.1. По результатам измерений сравнить погрешность механического и зондового методов измерения уровня для различных углов откоса.

5.2. Составить отчет о проведенной работе.

6 Требования к отчету

Отчет должен содержать наименование работы, цель работы, схему установки и ее краткое описание, результаты работы в виде таблицы и выводы. В выводах отразить точность и надежность каждого метода.

7 Контрольные вопросы

1. Датчики каких типов служат для измерения уровня?
2. С чем связаны трудности при определении уровня сыпучих сред?
3. Как классифицируются приборы для измерения уровня сыпучих материалов?
4. Для чего предусмотрены контакты SL в лабораторной установке?
5. В чем отличие поплавкового и буйкового уравнемеров?
6. Почему слеживаемость сыпучих материалов усложняет определение уровня?
7. Какие виды слеживаемости существуют?

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ

Лица, впервые приступившие к работе в новой для них лаборатории, должны получить инструктаж по технике безопасности от учебного мастера. В каждой лаборатории существуют, помимо общих, свои специфические особенности, способные привести к травмам и другим несчастным случаям. Особое внимание должно быть обращено на места возможного поражения электрическим током, на аппаратуру и линии, работающие под большим давлением, на правила их безопасного использования и на другие специфические опасные устройства.

Наиболее частым видом травм при выполнении работ в лаборатории технологических измерений и приборов является поражения электрическим током. Это связано с непосредственным соприкосновением с токонесущими частями различных лабораторных установок, нарушением заземлением, самопроизвольным подсоединением лабораторного оборудования к источникам питания.

Для предотвращения травм необходимо соблюдать следующие правила:

1. Следует подробно изучить устройство лабораторного стенда, на котором предстоит провести работы, используемую на нем аппаратуру и порядок выполнения работ.
2. Включать приборы в сеть необходимо только в присутствии лаборанта или учебного мастера.
3. Перед включением необходимо проверить заземление оборудования.

После окончания опытов на стенде вся аппаратура выключается и приводится в состояние, соответствующее первоначальному.

Список рекомендуемой литературы

1. Блинов О.М., Беленький А.М., Бердышев В.Ф. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Металлургия, 1993. 288 с.
2. Бурдин Г.Д., Калашников Н.В., Стоцкий Л.Р. Международная система единиц. – М.: Высшая школа, 1964.
3. Беклемишев А.В. Меры и единицы физических величин. – М.: Физматгиз, 1963.
4. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы. Справочное пособие / под ред. Б.Д. Кошарского. – Л.: Машиностроение, 1976. – 485 с.
5. Климовицкий М.Д., Шишкинский В.И. Приборы автоматического контроля в металлургии. Справочник. – М.: Металлургия, 1979. – 296 с.
6. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
7. Чистяков С.Ф., Радугин Д.В. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1972. – 392 с.
8. Логинов В.Т. Технологические измерения и приборы. Учебное пособие для семинарских занятий и КНИР. – М.: Высшая школа, 1983. – 128 с.
9. Технологические измерения и приборы. Лабораторный практикум. – М.: МИСиС, 1990. – 129 с, №165.
10. Лабораторный практикум по технологическим измерениям и приборам. / Под ред. С.Ф. Чистякова. – М.: «Высшая школа», 1970. – 271 с.
11. Автоматическое управление металлургическими процессами. / Беленький А.М., Бердышев В.Ф., Блинов О.М., Каганов В.Ю. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
12. Линеveg Ф. Измерение температуры в технике. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
13. Основы метрологии и электрических измерений / Б.А. Авдеев, Е.М. Антоник, Е.М. Лушин и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 488 с.
14. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Т.Ф. Качество измерений. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
15. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: Энергия, 1985. – 328 с.
16. Метрология. Термины и определения. ГОСТ 16263-70.

Приложения

Таблица П1 – Единицы измерения физических величин по Международной системе единиц (СИ)

Наименования Величин	Обозначения	Единицы измерения	Обозначения единиц измерения	Определяющее уравнение
I. Основные единицы				
Длина	l ; (L); b; (B); r; (R); d; (D) s	метр	м	
Масса	m; (M)	килограмм	кг	
Время	t; (τ; T)	секунда	с	
Сила электрического тока	I	ампер	А	
Термодинамическая температура	T; (θ; τ)	градус Кельвина	К	
Сила света	I; J	свеча	св	
II. Дополнительные единицы				
Угол плоский	$\alpha, \beta, \gamma, \nu$ $\Theta; (\phi, \psi)$	радиан	рад	$\alpha = \frac{l}{r}$
Угол телесный	$\Omega; \omega$	стерадиан	стер	$\Omega = \frac{S}{r^2}$
III. Производные единицы				
<i>1. Механические единицы</i>				
Площадь	s; (A; S; f; F)	квадратный метр	м ²	$s = l b$
Объем, вместимость	V; (v)	кубический метр	м ³	$V = l b h$
Кривизна	ρ	метр в минус первой степени	1/м	$\rho = \frac{1}{r}$
Период	T	секунда	с	$T = \frac{2\pi}{\omega}$
Частота	f; (ν)	герц	Гц	$f = \frac{1}{T}$
Частота угловая	ω	радиан в секунду	рад/с	$\omega = 2\pi f$
Линейная скорость	v; c; (и; ω)	метр в секунду	м/с	$u = \frac{l}{t}$
Градиент линейной скорости	grad v	секунда в минус первой степени	1/с	$\text{grad } v = \frac{v_2 - v_1}{t}$
Градиент линейного ускорения	grad a	секунда в минус второй степени	1/с ²	$\text{grad } a = \frac{a_2 - a_1}{t}$
Угловая скорость	ω	радиан в секунду	рад/с	$\omega = \frac{\alpha}{t}$

продолжение таблицы П1

Угловое ускорение	ε, α	радиан на секунду в квадрате	рад/с ²	$\varepsilon = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t}$
Плотность (объемная масса; насыпная масса)	$\rho; (D)$	килограмм на кубический метр	кг/м ³	$\rho = \frac{m}{V}$
Относительная плотность	D	величина безразмерная		$d = \frac{\rho}{\rho_0}$
Удельный объем	v	кубический метр на килограмм	м ³ /кг	$v = \frac{V}{m}$
Мольный объем	$V_v; V_M$	кубический метр на киломоль	м ³ /кмоль	$V_v = \frac{V}{v}$
Расход: массовый	m_t	килограмм в секунду	кг/с	$m_t = \frac{m}{t}$
объемный	V_t	кубический метр в секунду	м ³ /с	$V_t = \frac{V}{t}$
мольный	v_t	киломоль в секунду	кмоль/с	$v_t = \frac{v}{t}$
Объемная (линейная) скорость (потока жидкости или газа)	$v, c, (u; \omega)$	метр в секунду	м/с	$v = \frac{V_t}{s}$
Массовая скорость (потока жидкости или газа)	$v_m; w_m; (v)$	килограмм в секунду на квадратный метр	кг/(с м ²)	$v_m = \frac{m_t}{s}$
Количество движения	$p; (mv)$	килограмм на метр в секунду	кг·м/с	$p = mv$
Момент количества движения	$L; I; J; (b)$	килограмм на метр в квадрате на секунду	кг·м ² /с	$L = pr$
Момент инерции (динамический)	I (J)	килограмм на метр в квадрате	кг·м ²	$I = mr^2$
Сила	F	ньютон	Н	$F = ma$
Импульс силы	i; (p)	ньютон-секунда	Н·с	$i = Ft$
Момент силы; момент пары сил; вращающий (крутящий) момент; изгибающий момент	M	ньютон-метр	Н·м	$M = Ft$
Импульс момента силы	L	ньютон-метр-секунда	Н·м·с	$L = Mt$
Давление	P	ньютон на квадратный метр	Н/м ²	$p = \frac{F}{s}$

продолжение таблицы П1

Деформация сдвига (угол сдвига)	$\gamma; (\eta)$	радиан	рад	$\gamma = \frac{\tau}{G}$
Модуль сдвига	G	ньютон на квадратный метр	Н/м ²	$G = \frac{\tau}{\gamma}$
Модуль упругости (модуль Юнга)	E	ньютон на квадратный метр	Н/м ²	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$
Динамическая вязкость	$\mu; \eta; (f)$	ньютон-секунда на квадратный метр	Н·сек/м ²	$\mu = \frac{F}{s \cdot \text{grad}v}$
Кинематическая вязкость	ν	квадратный метр на секунду	м ² /с	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
Текучесть	$\xi; \psi$	квадратный метр на ньютон в секунду	м ² /(Н·с)	$\xi = \frac{1}{\mu}$
Работа	A	джоуль	Дж	$A = F_1 \ell$
Энергия	E	джоуль	Дж	$E_p = mgh$
Мощность	P; N	ватт	Вт	$E_k = \frac{mv^2}{2}$
Ударная вязкость	α_H	джоуль на квадратный метр	Дж/м ²	$\alpha_H = \frac{A}{s}$
Поверхностное натяжение	$\sigma; (\gamma)$	джоуль на квадр. метр или ньютон на метр	Дж/м ² или Н/м	$\sigma = \frac{F}{\ell}$
<i>2. Тепловые единицы</i>				
Энтальпия	H; I	джоуль	Дж	$H=U+pV$
Свободная энергия	F	джоуль	Дж	$F=U-TS$
Функция Гиббса (свободная энтальпия)	G	джоуль	Дж	$G=F+pV$
Теплота сгорания топлива: массовая объемная	Q Q _v	джоуль на килограмм джоуль на кубический метр	Дж/кг Дж/м ³	$Q_v = \rho_H Q$
Теплоемкость	C	джоуль на градус	Дж/град	$C_m = \frac{Q_{1,2}}{t_2 - t_1}$
Энтропия системы	S	джоуль на градус Кельвина	Дж/К	$S_2 - S_1 = \frac{Q_{1,2}}{T_m}$
Удельная теплоемкость	C	джоуль на килограмм-градус	Дж/(кг·град)	$C_m = \frac{q_{1,2}}{t_2 - t_1}$









продолжение таблицы П1

Тепловой поток (тепловая мощность)	Φ	ватт	Вт	$\Phi = \frac{Q}{t}$
Температурный градиент	grad t	градус на метр	град/м	$\text{Grad } t = \frac{t_1 - t_2}{l}$
Коэффициент теплопроводности	λ	ватт на метр-градус	Вт/(м·град)	$\lambda = \frac{q}{\text{grad } t}$
Коэффициент теплообмена (теплоотдачи) теплопередачи	$\alpha, h;$ (К; U) k; h	ватт на квадратный метр-градус	Вт/(м ² ·град)	$k = \frac{q}{t - \tau}$
Коэффициент температуропроводности	a, (α, χ, k)	квадратный метр на секунду	м ² /с	$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$
Коэффициент лучеиспускания	C; σ	ватт на квадратный метр-градус Кельвина в четвертой степени	Вт/(м ² ·К ⁴)	$\sigma = \frac{M_{\text{ЭС}}}{T^4}$ $C = \frac{M_{\text{Э}}}{(T/100)^4}$
Относительный температурный коэффициент линейного расширения	$\alpha; (\lambda)$	градус в минус первой степени	1/град	$a = \frac{l - l_0}{l_0(t - t_0)}$
Газовая постоянная	R	джоуль на килограмм-градус	Дж/(кг·град)	$R = \frac{pV}{T}$
Универсальная газовая постоянная	R_v, R_0	джоуль на киломоль-градус	Дж/(кмоль·град)	$R_v = \frac{pV_v}{T}$
Скорость массопередачи	U	килограмм в секунду на квадратный метр	кг/(с·м ²)	$u = \frac{m_t}{s}$
3. Электрические и магнитные единицы				
Количество электричества, электрический заряд	Q	кулон	К	$Q = It$
Плотность электрического тока	J	ампер на квадратный метр	А/м ²	$j = \frac{I}{S}$
Электрический потенциал; разность электрических потенциалов; электродвижущая сила; электрическое напряжение	V; ϕ V_1 $V_2;$ ϕ_1 ϕ_2 E; (Э) U	вольт	В	$U = \frac{P}{I}$
Напряженность электрического поля	E	вольт на метр	В/м	$E = \frac{F}{Q}$

продолжение таблицы П1

Электрическая ёмкость	C	фарада	Ф	$C = \frac{Q}{U}$
Диэлектрическая проницаемость свободного пространства (электрическая постоянная) абсолютная относительная	ϵ_0 ϵ_a ϵ	фарада на метр	Ф/м	$\epsilon_a = \epsilon \epsilon_0$
Электрическое сопротивление	r, R	Ом	Ом	$r = \frac{U}{I}$
Электрическая проводимость	G	симнес	сим	$g = \frac{1}{r} = \frac{1}{U}$
Удельное электрическое сопротивление	ρ	ом-метр	Ом·м	$\rho = \frac{r}{l} \cdot s$
Магнитный поток	Ф	вебер	Вб	$d\Phi = -E \cdot dt$
Магнитная индукция	B	тесла	Тл	$B = \frac{\Phi}{s}$
Магнитодвижущая сила	F; θ U	ампер	А	$F = nI$ $U = F$
Напряженность магнитного поля	H	ампер на метр	А/м	$H = \frac{I}{2\pi r}$
Индуктивность	L M	генри	Гн	$M = \frac{\Phi}{I}$
Магнитная проницаемость: абсолютно свободного пространства (магнитная постоянная) относительная	μ_a μ_0 μ	генри на метр	Гн/м безразмерная	$\mu_a = \mu \mu_0$ $\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$
Магнитный момент тока	P_M	ампер-метр в квадрате	А·м ²	$\rho_M = Is$
Магнитное сопротивление	r_m, R_M	ампер на вебер	А/Вб	$r_m = \frac{F}{\Phi}$
Электрическая энергия; работа	W	джоуль	Дж	
Мощность электрической цепи	P	ватт	Вт	$P = IU$
Угловая частота	$\omega; \Omega$	радиан в секунду	Рад/с	
Частота электрического тока	f; ν	герц	Гц	

Таблица П2 – Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем (выпрямительный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с электронным преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с неизолированным термопреобразователем (термоэлектрический прибор)	
Ток постоянный	
Ток переменный (однофазный)	
Ток постоянный и переменный	
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)	
Прибор применять при вертикальном положении шкалы	
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы	
Класс точности прибора, например 1,5	1,5 1,5 

продолжение таблицы П2





Напряжение испытательное, например 2 кВ	
Прибор защищен от влияния внешнего магнитного поля (I категория защищенности)	
Прибор защищен от влияния внешнего электрического поля (I категория защищенности)	
Внимание! Смотри указания в инструкции по эксплуатации прибора	

Таблица П3 – Доверительные вероятности P для доверительного интервала

$$\frac{\Delta x(m)}{\sigma} = z$$

$$P = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Z	P	Z	P
0	0	1,6	0,89
0,1	0,08	1,8	0,93
0,2	0,16	2,0	0,95
0,3	0,24	2,2	0,972
0,4	0,31	2,4	0,984
0,5	0,38	2,6	0,990
0,6	0,45	2,8	0,995
0,7	0,51	3,0	0,997
0,8	0,57	3,2	0,9986
0,9	0,63	3,4	0,9993
1,0	0,68	3,6	0,9997
1,2	0,77	3,8	0,99986
1,4	0,84	4,0	0,99993

Таблица П4 – Градуировочные характеристики различных термопар

Термопара	Градуировка	Химический состав Электродов		Пределы применения, °С	
		Полож.	Отриц.	Ниж	Верх.
Платинородий-платиновая ТПП	ПП-1	Платинородий (90%Pt + 10%Rh)	Платина (100%)	0	<u>1300</u> 1600
Платинородий-платинородиевая ТПР	ПР30/6	Платинородий (70%Pt + 30%Rh)	Платинородий (94%Pt + 6%Rh)	300	<u>1600</u> 1800
Хромель-алюмелевая ТХА	ХА	Хромель 89%Ni+9,8%Cr+ 1%Fe + 0,2%Mn	Алюмель 94%Ni+2%Al+2, 5%Mn+1%Si+05 %Fe	200	<u>1000</u> 1300
Хромель-копелевая ТХК	ХК	То же	Копель 55%Cu + 45%Ni	200	<u>600</u> 800
Вольфрам-рениевая ТВР	ВР5/20	Вольфрамрений 95%W + 5%Re	Вольфрамрений 80%W + 20%Re	0	<u>2200</u> 2500
Медь – константовая	МК	Медь (100%Cu)	Константан 42%Ni + 58%Cu	-250	<u>350</u> 500
Вольфрам – рениевая	ВР10/20	Вольфрамрений 90%W + 10%Re	Вольфрамрений 80%W + 20%Re	0	<u>2200</u> 2500
Вольфрам – молибденовая	ВМ	Вольфрам (100%W)	Молибден (100%Mo)	1250	<u>2000</u> 2000
Вольфрам – молибденовая	ЦНИИЧМ-1	Вольфрам (100%W)	Молибден–алюминий 99,5%Mo + 0,5%Al	1000	<u>2000</u> 2400

продолжение таблицы П4

Термопара	Пределы допускаемой погрешности в °С при температуре				Хим.состав, цвет, оплетки удлиненого провода		Т.э.д.с. при $t_2=100^{\circ}\text{C}$, $t_1=0^{\circ}\text{C}$, мВ
	300	800	1500	1800	Полож.	Отриц	
Платинородий-платиновая ТПП	1,23	2,06	3,36	-	Медь П, красный	Медноникелевый сплав (99,4%Cu + 0,6%Ni), зеленый	0,64±0,03
Платинородий-платинородиевая ТПР	3,20	3,51	4,31	5,17	Медь	Медь	-
Хромель-алюмелевая ТХА	3,9	6,5	-	-	Медь М, красный	Константан 42%Ni + 58%Cu коричневый	4,10±0,16
Хромель-копелевая ТХК	2,4	5,8	-	-	Хромель ХК красный	Копель, желтый	6,95±0,2
Вольфрам-рениевая ТВР	5,00	5,00	7,40	9,60	Медь МК красный	Медноникелевый сплав 97,6%Cu + 2,4%Ni, синий	1,33±0,03
Медь – константовая	0,5-1,0	-	-	-	То же	Константан, коричневый	4,10±0,16
Вольфрам – рениевая	-	-	-	-	То же	Медноникелевый сплав 98,8%Cu + 1,2%Ni, синий	0,97±0,02
Вольфрам – молибденовая	-	-	5,00	-	То же	Медноникелевый сплав 99,7%Cu + 0,3%Ni, белый	0,40±0,03
Вольфрам – молибденовая	-	-	-	-	То же	Медь	-

Таблица П5 – Номинальные статистические характеристики термоэлектрических преобразователей

Т, °С	Типы термоэлектрических преобразователей							
	ТПР	ТПП	ТВР	ТВР	ТВР	ТХА	ТХК	ТМК
1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200						-5,892	-9,488	-6,153
-150						-4,914	-7,831	-5,111
-100						-3,553	-5,641	-3,715
-50						-1,889	-3,003	-2,000
0		0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0
50		0,299	0,637	0,630	0,625	2,022	3,229	2,253
100		0,645	1,337	1,337	1,318	4,095	6,842	4,271
150		1,029	2,086	2,100	2,062	6,137	10,591	
200		1,440	2,871	2,901	2,842	8,137	14,519	
250		1,873	3,682	3,728	3,647	10,152	18,599	
300	0,431	2,323	4,512	4,570	4,469	12,207	22,806	
350	0,596	2,786	5,354	5,422	5,302	14,292	27,111	
400	0,786	3,260	6,203	6,279	6,141	16,395	31,482	
450	1,002	3,743	7,035	7,138	6,984	18,513	35,886	
500	1,241	4,234	7,908	7,996	7,826	20,640	40,229	
550	1,565	4,732	8,758	8,853	8,667	22,722	44,703	
600	1,791	5,237	9,605	9,706	9,505	24,902	49,094	
650	2,100	5,751	10,448	10,554	10,339	27,022	53,477	
700	2,430	6,274	11,283	11,397	11,167	29,128	57,857	
750	2,782	6,805	12,112	12,234	11,990	31,214	62,215	
800	3,154	7,345	12,993	13,063	12,805	33,277	66,469	
850	3,546	7,892	13,746	13,884	13,612	35,314		
900	3,957	8,448	14,549	14,695	14,410	37,325		
950	4,386	9,012	15,342	15,497	15,199	39,310		
1000	4,833	9,585	16,125	16,287	15,978	41,269		
1050	5,297	10,165	16,893	17,065	16,745	43,202		
1100	5,777	10,754	17,659	17,831	17,501	45,108		
1150	6,273	11,348	18,409	18,585	18,245	46,985		
1200	6,783	11,947	19,146	19,326	18,976	48,828		
1250	7,308	12,550	19,872	20,054	19,695	50,633		
1300	7,845	13,155	20,584	20,769	20,401	52398		
1350	8,393	13,761	21,284	21,471	21,095			
1400	8,952	14,368	21,971	22,163	21,776			
1450	9,519	14,973	22,645	22,842	22,444			
1500	10,094	15,576	23,306	23,509	23,101			
1550	10,674	16,176	23,953	24,165	23,745			
1600	11,257	16,671	24,588	24,808	24,377			
1650	11,842		25,209	25,437	24,996			
1700	12,426		25,816	26,052	25,601			

продолжение таблицы П5

1750	13,008		26,411	26,649	26,192			
1800	13,585		26,992	27,226	26,767			
1850			27,560					
1900			28,144					
1950			28,655					
2000			29,181					
2050			29,693					
2100			30,189					
2150			30,671					
2200			31,138					
2250			31,589					
2300			32,024					
2350			32,445					
2400			32,853					
2450			33,250					
2500			33,638					

Таблица П6 – Пределы допустимых основных погрешностей термоэлектрических термометров при температуре свободных концов 0 °С

Обозначение типов термоэлектр. термометров	Обозначение градуировки	Интервал температур, °С	Пределы допустимых основных погрешностей, мВ
ТПП	ПП	0-300 свыше 300-1600	$\Delta E_T = 0,01$ $\Delta E_T = 0,01 + 2,5 \cdot 10^{-5} (t-300)$
ТПР	ПР30/6	свыше 300-1800	$\Delta E_T = 0,011 + 2,5 \cdot 10^{-5} (t-300)$
ТВР	ВР5/20	0-1000 свыше 1000-1600	$\Delta E_T = 0,08$ $\Delta E_T = 0,08 + 4,0 \cdot 10^{-5} (t-1000)$
ТХА	ХА	-50-300 свыше 300-1300	$\Delta E_T = 0,16$ $\Delta E_T = 0,16 + 2,0 \cdot 10^{-4} (t-300)$
ХТК	ХК	-50-300 свыше 300-800	$\Delta E_T = 0,2$ $\Delta E_T = 0,2 + 6,0 \cdot 10^{-4} (t-300)$

Таблица П7 – Основные технические характеристики стандартных удлиняющих термоэлектрических проводов

Тип ТТ	Термоэлектродные провода				Обозначение проводов	Т.э.д.с. при $t_p = 100\text{ }^\circ\text{C}$ и $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$	Допускаемое отклонение значения т.э.д.с.
	Положительный		отрицательный				
	материал	цвет оплетки	материал	цвет оплетки			
ТХК	Хромель	Фиолетовый	Копель	Желтый	ХК	6,95	0,2
ТХА	Медь	Красный	Константан	Коричневый	М	4,10	0,15
ТПП	Медь	Красный	Сплав ТП (99,4% Cu, 10,6% Cu	Зеленый	ПП	0,64	$\pm 0,03$