



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**



**Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение
и возобновляемые источники энергии»**

**С. В. Климович
И. В. Янцевич**

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пособие

**Минск
БНТУ
2018**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение
и возобновляемые источники энергии»

С. В. Климович
И. В. Янцевич

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пособие для студентов специальности
1-36 20 01 «Низкотемпературная техника»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области машиностроительного
оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2018

УДК 621.1.002.56 (076.5)

ББК 31.32я7

К49

Р е ц е н з е н т ы:

канд. техн. наук, доцент *В. И. Назаров*;

канд. техн. наук, доцент *А. Б. Сухоцкий*;

А. В. Горбач

Климович, С. В.

К49 Приборы и техника специальных измерений : пособие для студентов специальности 1-36 20 01 «Низкотемпературная техника» / С. В. Климович, И. В. Янцевич. – Минск: БНТУ, 2018. – 91 с.
ISBN 978-985-550-799-5.

Пособие содержит теоретический материал и практические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Приборы и техника специальных измерений» для студентов специальности 1-36 20 01 «Низкотемпературная техника».

Пособие составлено в соответствии с учебным планом специальности и программой дисциплины.

УДК 621.1.002.56 (076.5)

ББК 31.32я7

ISBN 978-985-550-799-5

© Климович С. В., Янцевич И. В., 2018

© Белорусский национальный
технический университет, 2018

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОМЕТРОВ РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: изучение принципа действия и конструкции стеклянных жидкостных термометров расширения. Определение погрешности измерения технического термометра.

Основные положения

Стеклянные термометры являются одним из наиболее точных средств измерения температуры. Диапазоны измерения температуры от минус 200 до 600 °С. **Класс точности 0,01; 0,02; 0,04; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0.**

Принцип действия стеклянных жидкостных термометров основан на расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре, при увеличении температуры.

Прирост единицы объема вещества при нагреве на 1° (градус) называется **объемным** (или **кубическим**) **коэффициентом расширения β** . Выражение, определяющее изменения объема v тела при нагреве, имеет вид

$$v = v_0 (1 + \beta t), \quad (1.1)$$

где v_0 – начальный объем тела, м³;

β – объемный (или кубический) коэффициент расширения тела;

t – температура тела, °С.

Стеклянные термометры по своей конструкции бывают **палочными** и с **вложенной шкалой**.

Стеклянный термометр с вложенной шкалой состоит из стеклянного резервуара и припаянного к нему стеклянного капилляра 2 (рис. 1.1, а). Вдоль капилляра расположена шкала 3, которая, как правило, наносится на пластине молочного стекла. Резервуар, капилляр и шкала помещаются в стеклянную оболочку 4, которая припаивается к резервуару. **Палочные стеклянные термометры** изготавливаются из толстостенных капилляров 1, к которым припа-

ивается резервуар 2. Шкала термометра 3 наносится на наружной поверхности капилляра (рис. 1.1, б).

Температура измеряемой среды, в которую помещены резервуар и часть капилляра, определяется по изменению объема термометрической жидкости, отсчитываемому по положению уровня жидкости в капилляре, который отградуирован в градусах Цельсия.

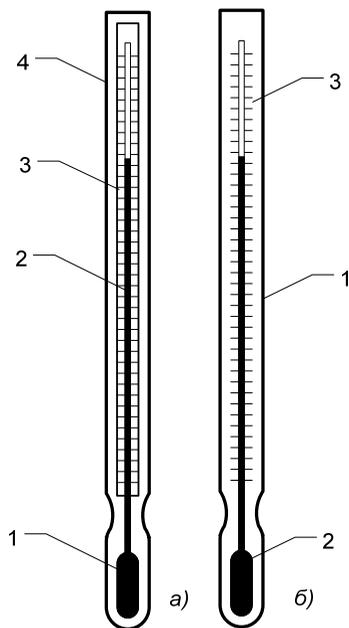


Рис. 1.1. Лабораторные ртутные термометры:
а – с вложенной шкалой; б – палочный

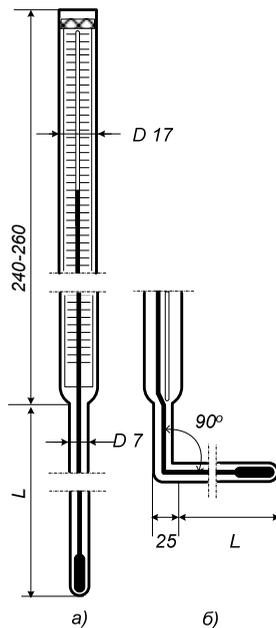


Рис. 1.2. Технические стеклянные термометры:
а – прямой; б – угловой

Одновременно с расширением термометрической жидкости происходит также расширение резервуара и капилляра. Фактически мы судим о температуре не по изменению объема жидкости, а по видимому изменению объема термометрической жидкости в стекле. Поэтому видимое расширение жидкости несколько меньше действительного. В табл. 1.1 приведены некоторые термометрические жидкости, их характеристики измерения $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ определяются прочностными характеристиками стекла.

В связи с тем, что температура кипения ртути при атмосферном давлении значительно меньше верхнего предела применения ртутных термометров, в термометрах, предназначенных для измерения высоких температур, капилляр над ртутью заполняется инертным газом, например азотом. При этом для исключения образования паров ртути в капилляре давление газа должно быть тем больше, чем выше верхний предел измерения. Для термометров с верхним пределом измерения 600 °С давление газа над ртутью превышает 3 МПа (30 кгс/см²).

Таблица 1.1

Термометрические жидкости

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

Примечание:

1. Коэффициент видимого расширения ртути в термометре из боросиликатного стекла составляет 0,000164 К⁻¹, а в кварцевом стекле 0,00018 К⁻¹.

2. Под видимым коэффициентом объемного теплового расширения понимают разность между коэффициентами объемного теплового расширения термической жидкости и стекла.

Стекланные термометры с органическими термометрическими жидкостями применяются в интервале температур от минус 200 до 200 °С. Однако эти жидкости смачивают стекло и поэтому требуют применения капилляров с относительно большим диаметром канала.

Достоинства стеклянных жидкостных термометров:

- высокая точность измерения;
- простота;
- дешевизна.

Недостатки стеклянных термометров:

- относительно плохая видимость шкалы;
- практическая невозможность передачи показаний на расстояние;
- невозможность автоматической регистрации показаний;
- невозможность ремонта термометров.

В зависимости от области применения по методике градуировки термометры делятся на две группы:

- **термометры, градуируемые при полном погружении;**
- **термометры, градуируемые при неполном погружении** (как правило, при определенной длине погружения нижней части).

Термометры **полного погружения** применяются, как правило, в лабораторных условиях и позволяют обеспечить более высокую точность. Глубина их погружения должна изменяться при изменении температуры.

Термометры **неполного погружения** (технические) – применяются для измерения температур в промышленности; глубина их погружения должна быть постоянной.

В связи с этим конструктивно технические термометры выполнены таким образом, что диаметр их нижней («хвостовой») части существенно меньше диаметра их верхней части, в которой расположена шкала. Эти термометры погружаются в измеряемую среду на глубину нижней части.

Различие в градуировке и применении стеклянных термометров вызвано тем, что при измерении температуры могут иметь место систематические погрешности, характерные для данного средства измерения.

Выпускаются следующие разновидности стеклянных термометров.

1. **Технические ртутные термометры с вложенной шкалой, прямые и угловые** (рис. 1.2, *а, б*), выпускаются 11 модификаций со шкалами $-90+30$; $-60+50$; $-30+50$; $0-100$; $0-160$; $0-200$; $0-300$; $0-350$; $0-450$; $0-500$ и $0-600$ °С. Цена деления шкалы составляет от 0,5 °С (шкала $-30+50$ °С) до 5 и 10 °С (шкала $0-600$ °С).

2. **Лабораторные ртутные термометры палочные и с вложенной шкалой** (см. рис. 1.1, а, б) предназначены для измерения температур от -30 до $+600$ °С. Эти термометры погружаются в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Термометры подразделяются на четыре группы. Термометры с ценой деления $0,1$ °С имеют диапазон измерения 55 °С (например, $0-55$ °С или $200-255$ °С) с верхним пределом измерения не более 305 °С. Для больших диапазонов измерения $0-500$ °С, $0-600$ °С цена деления шкалы 2 °С.

3. **Жидкостные (не ртутные) термометры**, выпускаются палочные, с вложенной шкалой и с наружной шкальной пластиной на пределы измерения от -200 до $+200$ °С с ценой деления от $0,2$ до 5 °С.

4. **Термометры ртутные повышенной точности и образцовые** выпускаются с узкими диапазонами измерения (от 4 до 50 °С) и с ценой деления от $0,01$ до $0,1$ °С.

5. **Термометры ртутные электроконтактные** выпускаются для поддержания постоянной температуры или сигнализации заданной температуры в интервале от -30 до $+300$ °С.

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

Допускаемые погрешности технических термометров не должны превышать деления шкалы. Например, при цене деления $0,5$ °С предел допускаемой погрешности составляет $\pm 0,5$ °С, а при цене деления 10 °С предел составляет $+10$ °С. Для других разновидностей термометров пределы допускаемых погрешностей определяются техническими требованиями, причем они могут быть больше цены деления. Например, для лабораторных термометров с ценой деления $0,5$ °С предел допускаемой погрешности составляет $+1$ °С, а для образцовых термометров с ценой деления $0,01$ °С предел допускаемой погрешности составляет $\pm 0,05$ °С.

Стекланные термометры являются одним из наиболее точных средств измерения температуры.

Стекло относится к материалам, обладающим значительным термическим последствием. Вследствие этого при охлаждении после временного нагрева резервуар термометра не сразу принимает тот объем, который соответствовал первоначальной температуре. Кроме того, в стекле в течение долгого времени после того, как оно было нагрето до размягчения, происходят молекулярные перемещения,

в результате чего объем резервуара вновь изготовленного термометра уменьшается очень медленно. Такое явление называется естественным старением. Это приводит к постепенному смещению нулевой точки. Последнее может быть в значительной степени уменьшено искусственным старением, т. е. продолжительным нагревом (отжигом) термометра до температуры, соответствующей верхнему пределу шкалы, с постепенным охлаждением его до температуры воздуха в помещении.

Поэтому при применении точных и повышенной точности лабораторных термометров рекомендуется производить поверку *нулевой точки*. При этом перед поверкой термометр должен быть нагрет до температуры, соответствующей верхнему значению его шкалы. Затем термометр должен остыть при комнатной температуре, и после этого он должен быть помещен в термостат, где поддерживается температура плавления льда $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если положение нулевой точки изменится против указанного в свидетельстве и будет в пределах допустимой погрешности, то ко всем поправкам в свидетельстве надо алгебраически добавить значение $\delta(t)$:

$$\delta(t) = t_0 - t'_0, \quad (1.2)$$

где t_0 – положение нулевой точки, указанное в свидетельстве;

t'_0 – положение нулевой точки, вновь найденное опытным путем.

Если при измерении температуры лабораторный термометр, предназначенный для полного погружения, не может быть погружен в среду, температура которой измеряется, до отсчитываемого деления, то следует вводить поправку в его показания на выступающий столб. Эта поправка указывает, насколько показания термометра меньше (или больше) той температуры, которую термометр показал бы при погружении в среду до отсчитываемого деления. При поверке термометры такого типа погружаются в среду, заполняющую термостат, до отсчитываемого деления. Следовательно, вся заполняющая резервуар и капилляр термометрическая жидкость находится при температуре среды. Выступающий столбик термометра при измерении имеет другую температуру, поэтому и приходится вносить поправку в показания термометра.

Среднюю температуру выступающего столбика обычно измеряют с помощью вспомогательного палочного термометра, резервуар которого прижимается к основному термометру в середине выступающей части столба. При этом вспомогательный термометр должен быть хорошо закреплен и изолирован асбестовым шнуром, как показано на рис. 1.3, б. Вспомогательный палочный термометр рекомендуется брать малых размеров.

Поправка на выступающий столбик, °С, может быть подсчитана по формуле

$$\Delta t = n\beta(t - t_{\text{в.с}}), \quad (1.3)$$

где n – число градусов в выступающем столбике, °С;

β – видимый температурный коэффициент объемного расширения термометрической жидкости в стекле, K^{-1} ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);

t – температура, показываемая термометром, °С;

$t_{\text{в.с}}$ – температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром, °С.

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

В этом случае поправка определяется из выражения

$$\Delta t = m\beta(t - t_{\text{в.с}}), \quad (1.4)$$

где t – температура, показываемая термометром, °С;

$t_{\text{в.с}}$ – температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром, °С;

m – число градусов, отсчитываемое по термометру при нормальной глубине его погружения, °С;

β – видимый температурный коэффициент объемного расширения термометрической жидкости в стекле, K^{-1} ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Порядок выполнения работы

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.3. Лабораторная установка состоит из термостата 1 для поддержания заданной температуры рабочего тела при проведении эксперимента, штатива 5, держателя 6 (рис. 1.3, а), поверяемого термометра 2, асбестового шнура 3 для закрепления вспомогательного термометра 4 (рис. 1.3, б).

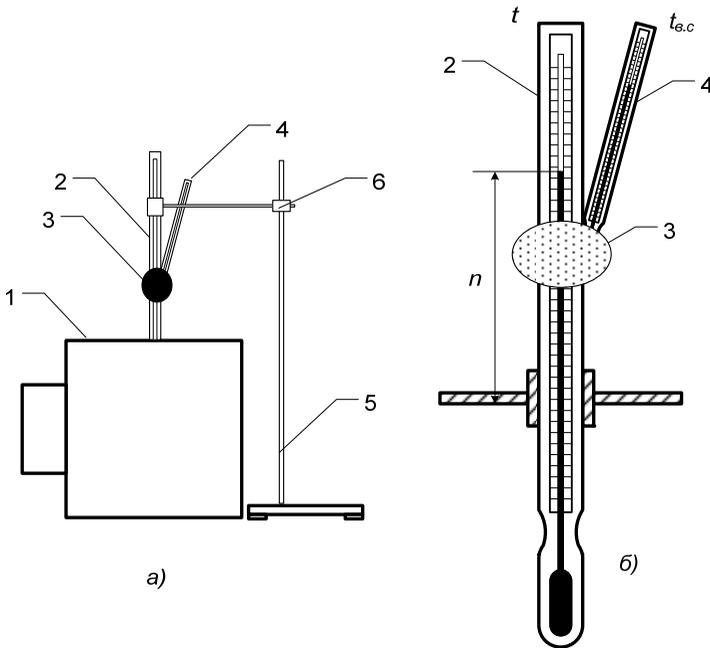


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки:
а – общий вид; б – крепление поверяемого и вспомогательного термометров

Для выполнения лабораторной работы:

1. Из паспорта термометра занести в табл. 1.2 тип и пределы измерений термометра $t_{н. \text{пш}}$ и $t_{в. \text{пш}}$ а также t_0 . Затем включить в электрическую сеть термостат, нажав кнопку «Сеть», и задать на регуляторе температуры начальную температуру эксперимента, соответствующую верхнему пределу шкалы термометра $t_{в. \text{пш}}$, °С.

Установить на штативе в держателе поверяемый термометр и опустить в рабочее тело термостата через отверстие в крышке. Как только термометрическая жидкость достигнет верхнего предела шкалы термометра $t_{в.шш}$, °С, достать термометр из термостата и дать ему охладиться до температуры окружающей среды. После чего поместить в термостат, где поддерживается температура плавления льда 0 °С, и зафиксировать показание t'_0 . Показания занести в таблицу измерений и результатов (табл. 1.2)

2. Затем установить на штативе в держателях поверяемый термометр с предварительно закрепленной на нем асбестовой обмоткой и вспомогательным термометром. Опустить поверяемый термометр в рабочее тело термостата через отверстие в крышке с заданной температурой эксперимента, задавшись половиной шкалы поверяемого термометра. После достижения данной температуры рабочего тела в термостате и выдерживания термометра в течение 3–5 минут при данной температуре показания термометров занести в табл. 1.3;

3. По полученным результатам рассчитать смещение нулевой точки по формуле (1.2) и поправку на выступающий столбик по формулам (1.3) и (1.4), расчеты занести в табл. 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Тип термометра	t_0	t'_0	$\delta(t)$

Таблица 1.3

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Тип термометра	t , С	$t_{в.с}$, С	β , К ⁻¹	n , °С	m , °С	Δt , °С

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель работы: изучение принципа действия и конструкции термоэлектрических преобразователей. Построение индивидуальной градуировочной характеристики термоэлектрического преобразователя.

Основные положения

Принцип действия термоэлектрических преобразователей для измерения температуры основан на эффекте *Зебека* – зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) термопары от температуры. Термо-ЭДС возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников, при неравенстве температур в местах соединения этих проводников (рис. 2.1). Термо-ЭДС появляется по причине скачков суммы потенциала в контактах (спаях) термопары и суммы изменений потенциала, вызванных диффузией электронов, и зависит от материала проводников и их температуры.

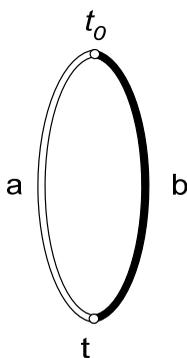


Рис. 2.1. Термоэлектрическая цепь

Развиваемая термо-ЭДС зависит от значения обеих температур t и t_0 , причем она увеличивается с ростом разности $(t - t_0)$, поэтому термо-ЭДС термопары условно обозначается символом $E(t, t_0)$.

Температуру с помощью термопары можно измерить, если *выполнить* следующие условия:

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

Теорема о третьем проводнике Зебека: *включение в цепь термопары третьего проводника из любого материала «С» (на всех схемах рис. 2.2 он изображен волнистой линией) не вызывает искажения термо-ЭДС, если температуры мест присоединения этого проводника одинаковы.*

Термопара – соединение двух разнородных проводников электродов.

Термоэлектрический преобразователь (ТЭП) – термопара, электроды которой изолированы и помещены в защитную арматуру.

Термоэлектрический термометр – измерительная цепь для получения численных значений измеряемой температуры, в которой к термоэлектрическому преобразователю подключен показывающий прибор, измеряющий термо-ЭДС термопары, шкала которого в градусах (*пирометрический милливольтметр*).

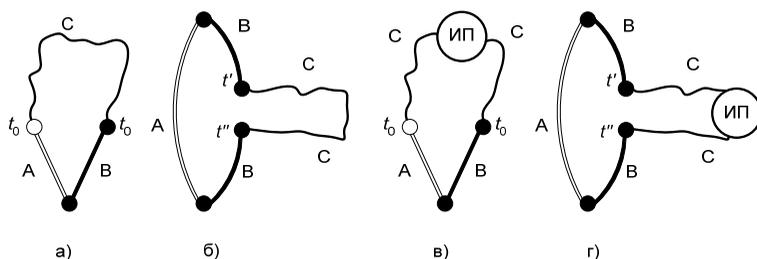


Рис. 2.2. Цепи термопар:

а, б – варианты включения третьего проводника;
в, г – варианты включения измерительного прибора (ИП)

Номинальная статическая характеристика преобразования (НСХ) – зависимость, развиваемая термопреобразователем термо-ЭДС от температуры рабочего спая (при нулевой температуре свободных концов $t_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (т. е. $E(t, 0) = f(t)$).

Статическая характеристика термопреобразователя может быть задана аналитически, графически или в виде таблицы.

Коэффициентом преобразования (чувствительностью) термопары называется отношение изменения термо-ЭДС, вызванной изменением температуры рабочего конца к значению этого изменения γ при небольших значениях Δt .

$$\gamma = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \text{ мВ/ } ^\circ\text{C}.$$

Для нелинейной статической характеристики

$$\gamma = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta E}{\Delta t} \right| = \frac{dE}{dt}.$$

Класс ТЭП – отклонение реальной градуировочной характеристики от номинальной, классы обозначаются цифрами 1, 2, 3 (в порядке увеличения погрешности, при этом внутри класса погрешность может зависеть от измеряемой температуры).

В табл. 2.1 в соответствии с ГОСТ 6616–94 приведены обозначения НСХ и пределы применения для различных ТЭП

Таблица 2.1

Стандартные термоэлектрические термометры

Тип термопары термоэлектрического термометра	Условное обозначение НСХ		Рабочий диапазон длительного режима работы, $^\circ\text{C}$	Максимальная температура кратковременного режима работы, $^\circ\text{C}$
	ГОСТ Р 6616–94	ГОСТ 3044–84		
Медь-константановые	T	ТМК	–200–+400	900
Железо-константановые	J	ТЖК	–200–+700	900
Хромель-константановые	E	ТХК	–200–+700	900
Хромель-копелевая	L	ТХК	– 200–+600	800

Тип термопары термоэлектрического термометра	Условное обозначение НСХ		Рабочий диапазон длительного режима работы, °С	Максимальная температура кратковременного режима работы, °С
	ГОСТ Р 6616–94	ГОСТ 3044–84		
Никельхром-никельалюминиевая (хромель-алюмелевая)	К	ТХА	–200–+1000	1300
Никросил-нисиловые	N	ТНН	–270–+1300	1300
Платинородий-платиновая	S	ТПП	0–+1300	1600
	R	ТПП	0–+1300	1600
Платинородий-платинородиевая	B	ТПР	300–1600	1800
Вольфрамрений-вольфрамрениевая	A	ТВР	0–2200	2500

Два любых разнородных проводника могут образовать термопару, но для практических температурных измерений могут использоваться только соответствующие ряду требований, которые подразделяют на **обязательные** и **желательные**.

Обязательные требования:

- стабильность (однозначность и линейность градуировочной характеристики);
- воспроизводимость (в необходимых количествах материалов, обладающих вполне определенными термоэлектрическими свойствами).

Желательные:

- жаростойкость;
- жаропрочность;
- химическая стойкость и т. д.

Для удобства применения термоэлектрический преобразователь специальным образом армируется. При этом преследуются следующие цели:

- электрическая изоляция термоэлектродов;
- защита термоэлектродов от вредного воздействия измеряемой и окружающей сред;

- защита термоэлектродов и зажимов выводов термоэлектродов от загрязнений и механических повреждений;
- придание термоэлектрическому термометру необходимой механически прочности;
- обеспечение удобства монтажа на технологическом оборудовании и удобства подключения соединительных проводов.

Конструкции защитной арматуры термоэлектрических термопреобразователей и кабелей унифицированы (рис. 2.3 и 2.4). Они отличаются в основном конструкцией защитных чехлов, рассчитанных на различные давления, и конструкцией штуцеров. Головка к защитным чехлам для многих модификаций одна.

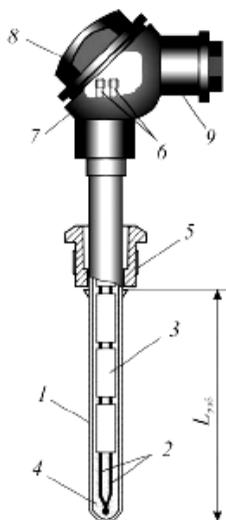


Рис. 2.3. Конструкция термопреобразователя:

- 1 – защитный чехол; 2 – термоэлектроды; 3 – изоляционные бусы; 4 – порошок;
 5 – штуцер; 6 – розетка с клеммами; 7 – головка; 8 – крышка;
 9 – штуцер под кабель

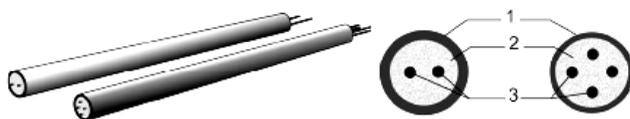


Рис. 2.4. Термопарный кабель с одной или двумя парами термоэлектродов:
 1 – оболочка кабеля; 2 – минеральная изоляция (MgO); 3 – термоэлектроды

Порядок выполнения работы

Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.5. Лабораторная установка состоит из термостата 1, термометра 2, штатива с держателем 4, термопары 3, компенсационных проводов 5, термометра 7, показывающего температуру в сосуде Дюара 6, соединительных проводов 8, милливольтметра 9.

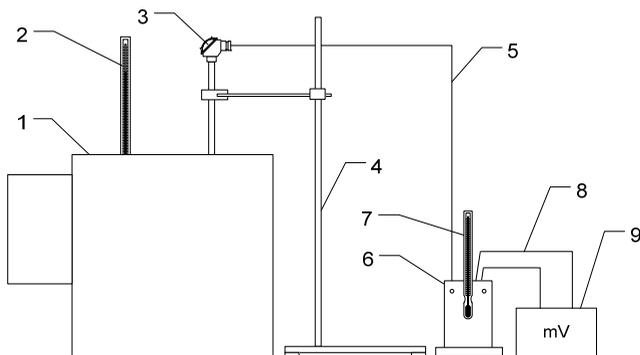


Рис. 2.5. Схема лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы:

1. Собрать измерительную цепь ТП-милливольтметр. Установить на штативе в держателе поверяемый ТП и поместить в термостат. Включить в электрическую сеть термостат, нажать кнопку «Вкл.». Задать на регуляторе температуры нагрев в $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
2. При достижении температуры рабочего тела в термостате $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ произвести запись показаний регулятора температуры термостата t , термометров 2 ($t_{\text{в}}$) и 7 ($t_{\text{хс}}$) и показаний прибора 9 в табл. 2.2 и 2.3. Далее снимать данные показания через каждые $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. При выходе на заданный режим $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ регулятор температуры термостата перевести в положение «минимум». Отжать кнопку «Сеть» и выключить оборудование из электросети.

Исходя из полученных данных, по градуировочным таблицам для данного типа термопар определить значение термо-ЭДС холодного спае $E_{\text{хс}}$, соответствующее температуре холодных спаев $t_{\text{хс}}$, установленной по показаниям стеклянного термометра 7.

Рассчитать суммарную термо-ЭДС воды E'_{MB} с учетом найденного значения поправки E_{xc} на температуру холодного спая и показания прибора 10 по формуле

$$E'_{\text{MB}} = E_{\text{MB}} + E_{\text{xc}}.$$

По найденному значению E'_{MB} определить температуру воды t_{B} по градуировочной таблице. Сравнить полученное значение t_{B} с показанием термометра 2 и действительным значением температуры кипения воды t_{a} , рассчитанным по формуле

$$t_{\text{a}} = 100 + 28,012 \left(\frac{B}{P_0} - 1 \right),$$

где B – атмосферное давление по барометру (Па);

P_0 – номинальное атмосферное давление $P_0 = 101325,6$ Па.

Оценить абсолютную Δ и относительную погрешность δ измерений по формулам

$$\Delta = t_{\text{B}} - t_{\text{a}}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\delta = \frac{\Delta}{t_{\text{a}}} \cdot 100 \text{ } \%$$

По статическим характеристикам определить чувствительность термоэлектрических термометров градуировок ХК, ХА по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E_1 - E_n}{t_1 - t_n}, \text{ мВ}/^\circ\text{C},$$

где $\Delta E = E'_1 - E'_n$ – приращение входного параметра датчика в милливольтгах;

$\Delta t = t'_1 - t'_n$ – приращение температур, вызвавшее изменение термо-ЭДС на величину ΔE , $^\circ\text{C}$.

Построить по полученным данным графическую зависимость изменения термо-ЭДС для поверяемых типов термопар ХК, ХА и сравнить их с гостированными. Установить, во сколько раз крутизна характеристики (чувствительность) термометра градуировки ХК больше ХА.

Таблица 2.2

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Тип термопары	τ , мин	t , °C	$t_{в}$, °C	t_{xc} , °C	E_{xc} , мВ	E_{MB} , мВ

Таблица 2.3

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Тип термопары	E'_{MB} , мВ	$t'_{в}$, °C	B , Па	t_a , °C	Δ , °C	δ , %	γ , мВ/°C

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цель работы: изучение принципа действия и конструкции термопреобразователей сопротивления. Построение индивидуальной градуировочной характеристики термопреобразователя сопротивления.

Основные положения

Принцип действия термопреобразователей сопротивления основан на способности различных материалов (в первую очередь металлов) изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры.

Температурным коэффициентом электрического сопротивления (ТКЭС) называют параметр, характеризующий изменение электрического сопротивления с температурой. Температурный коэффициент выражается в $^{\circ}\text{C}^{-1}$ или K^{-1} .

Для материалов, у которых температурный коэффициент *не зависит от температуры*, он определяется

$$\alpha = \frac{(R_t - R_0)}{R_0 t},$$

где R_t и R_0 – сопротивления при температуре t и 0°C .

Для материалов, у которых **температурный коэффициент зависит от температуры**, определяется для каждого значения температуры:

$$\alpha = \frac{(1/R_0)}{(dR_t/dt)}.$$

Для чистых металлов температурный коэффициент находится в пределах $0,0035\text{--}0,0065 \text{ K}^{-1}$. У сплавов этот коэффициент существенно меньше и в некоторых случаях приближается к нулю (для марганца составляет $2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Для полупроводниковых матери-

алов температурный коэффициент отрицательный и на порядок больше, чем у металлов ($0,01-0,15 \text{ K}^{-1}$). Термопреобразователи сопротивления из чистых металлов, как правило, изготавливают из изоляционного материала путем специальной намотки тонкой проволоки на каркас. Для предохранения от повреждения проволоку вместе с каркасом помещают в защитную оболочку, также применяются и другие конструкции термометров сопротивления.

Наличие в металлах примесей уменьшает температурный коэффициент электросопротивления, поэтому металлы для термопреобразователей сопротивления должны иметь нормированную чистоту. Так как ТКЭС может изменяться с изменением температуры, **показателем степени чистоты** выбрана величина W_{100} – *отношение сопротивлений ТС при 100 и 0 °С*.

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}.$$

Для ТСП $W_{100} = 1,385$ или $1,391$, для ТСМ $W_{100} = 1,426$ или $1,428$. **Класс ТС** определяет допускаемые отклонения R_0 и W_{100} от номинальных значений, что, в свою очередь, определяет допускаемую абсолютную погрешность Δt преобразования термопреобразователя сопротивления. По допускаемым погрешностям термопреобразователи сопротивления подразделяются на три класса – А, В, С, – при этом платиновые ТС обычно выпускаются классов А, В, медные – классов В, С. Существует несколько стандартных разновидностей термопреобразователей сопротивления.

Термометром сопротивления называется комплект для измерения температуры, включающий термопреобразователь сопротивления (основанный на зависимости электрического сопротивления от температуры) и вторичный прибор, показывающий значение температуры в зависимости от измеряемого сопротивления, шкала которого градуирована в градусах.

Номинальной статической характеристикой (НСХ) термопреобразователя сопротивления является зависимость его сопротивления R_t от температуры t :

$$R_t = f(t).$$

Ее принято записывать в виде

$$R_t = W_t \cdot R_0,$$

где R_t – сопротивление ТС при температуре t , Ом;

W_t – значение отношения сопротивлений при температуре t к сопротивлению при 0°C (R_0). Значения W_t выбираются из таблиц ГОСТ Р 50353–92.

Условное обозначение их номинальных статических характеристик (НСХ) состоит из двух элементов – цифры, соответствующей значению R_0 и буквы, являющейся первой буквой названия материала:

П (Pt) – платина;

М (Cu) – медь;

Н (Ni) – никель.

Медные термометры сопротивлений в соответствии с ГОСТ 6651–78 могут применяться для длительного измерения температуры от -200 до $+200^\circ\text{C}$. Выпускаются II и III классов. Номинальные сопротивления при 0° составляют 10, 50 и 100 Ом, им соответственно присвоены следующие условные обозначения номинальных статических характеристик преобразования: 10М, 50М и 100М (в эксплуатации встречаются термопреобразователи с номинальной статической характеристикой $R_0 = 53$ Ом, для них принято обозначение **гр. 23**). Предел допускаемой основной погрешности выбирается из ряда 0,2, 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 и 20°C . Для термометров II класса он составляет 0,3 или $0,5^\circ\text{C}$, а для III класса 1 или 2°C .

Никелевые термометры сопротивления (стандарт СЭ 1057–78). Выпускаются никелевые термопреобразователи сопротивления на интервал температур от -60 до $+180^\circ\text{C}$, они выпускаются III класса. Номинальные сопротивления при 0°C составляют 50 и 100 Ом, им соответственно присвоены следующие условные обозначения номинальных статических характеристик преобразования: 50 Н и 100 Н. Никель обладает высоким температурным коэффициентом, достигающим $\alpha = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, и большим удельным сопротивлением $\rho = 1,28 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, что позволяет получать достаточно малогабаритные термометры с большим коэффициентом преобразования. Номинальное отношение R_{100}/R_0 для слабо легированного никеля установлено $1,617 \pm 0,004$.

Платиновые термометры сопротивления. Платиновые термопреобразователи сопротивления применяются для измерения температур от -260 до $+1100$ °С. Сопротивление платины имеет сложную нелинейную зависимость от температуры и для интервала температур от 0 до $+630$ °С может быть приближенно описано выражением

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

а на интервале от -183 °С до 0 °С – выражением

$$R_t = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2 + Ct^3 \cdot (t - 100)). \quad (3.1)$$

Платиновые термопреобразователи сопротивления могут иметь следующие сопротивления при 0 °С: 1 , 5 , 10 , 50 , 100 и 500 Ом. Этим термопреобразователям сопротивления присвоены следующие условные обозначения номинальной статической характеристики преобразования: $1П$, $5П$, $10П$, $50П$, $100П$ и $500П$ (в эксплуатации находятся термопреобразователи с номинальной статической характеристикой $R_0 = 46$ Ом, для них принято обозначение **гр. 21**). Для области температур от -260 до -200 °С номинальные статические характеристики платиновых термопреобразователей сопротивления составлены с учетом реального отношения R_{100}/R_0 (ГОСТ 6651–78). Одним из недостатков платины является ее загрязнение в восстановительной среде парами металлов, окислами углерода и другими веществами. Особенно сильно это проявляется при высоких температурах.

Материалы, применяемые для изготовления термопреобразователей сопротивления, должны отвечать обязательным требованиям:

- 1) стабильности градуировочной характеристики;**
- 2) требованию воспроизводимости.**

Желательные требования к материалам:

- *высокая чувствительность;*
- *линейность градуировочной характеристики;*
- *большое удельное сопротивление и др.*

Термопреобразователи сопротивления имеют специальную арматуру, сходную с арматурой термоэлектрических преобразователей. Существующая номенклатура представлена большим количеством различных вариантов конструктивного исполнения термопреобразователей сопротивления. На рис. 3.1 представлена

конструкция термопреобразователя сопротивления, которая чаще всего используется для измерения температуры в трубопроводах и других аппаратах, находящихся под давлением.

Чувствительный элемент металлического термопреобразователя сопротивления состоит, как правило, из проволоки или ленты, которая намотана на каркас из стекла, кварца, керамики, слюды или пластмассы. От чувствительного элемента идут выводы к зажимам головки термометра, к которым подсоединяются провода, идущие затем к измерительному прибору.

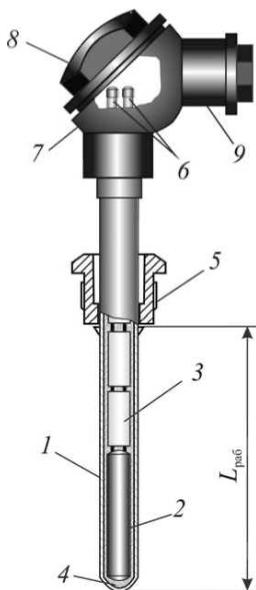


Рис. 3.1. Конструкция термопреобразователя сопротивления:

- 1 – защитный чехол; 2 – чувствительный элемент; 3 – изоляционные бусы;
- 4 – порошок; 5 – штуцер; 6 – розетка с клеммами; 7 – головка; 8 – крышка;
- 9 – штуцер под кабель

Для уменьшения влияния внешних электрических и магнитных полей чувствительные элементы термометров сопротивления делают с безындуктивной намоткой. Чувствительный элемент медного термопреобразователя сопротивления состоит из медной изолированной проволоки диаметром 0,1 мм, намотанной в несколько слоев на цилиндрический каркас из пластмассы или металла. Слои прово-

локи скрепляются между собой и каркасом лаком. К обоим концам проволоки припаиваются медные выводы диаметром 1–1,5 мм. Чувствительный элемент помещают в защитную оболочку. Кроме каркасных выпускаются бескаркасные чувствительные элементы медных термометров сопротивления. Чувствительный элемент изготавливается из изолированной проволоки диаметром 0,08 мм безындуктивной бескаркасной намоткой. Отдельные слои скреплены лаком, и затем весь чувствительный элемент обернут фторопластовой пленкой. Чувствительный элемент помещают в тонкостенную защитную металлическую оболочку, которая засыпается керамическим порошком и герметизируется.

Чувствительные элементы вследствие плотной засыпки пространства между спиралями и каркасом керамическим порошком оказываются достаточно прочными и вибростойкими. Они могут применяться в интервале температур от -260 до $+1000$ °С. Специально для низкотемпературных измерений разработаны конструкции миниатюрных платиновых термометров сопротивления.

Порядок выполнения работы

Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.2. Лабораторная установка состоит из термостата со стеклянной колбой 1, термометра 2, штатива с держателем 4, термометра сопротивления 3, калиброванных проводов 5 с сопротивлением каждого не более 0,001–0,0015 Ом, термометра 7, измеряющего температуру воды и льда в сосуде Дюара 6, моста сопротивлений 8, барометра 9.

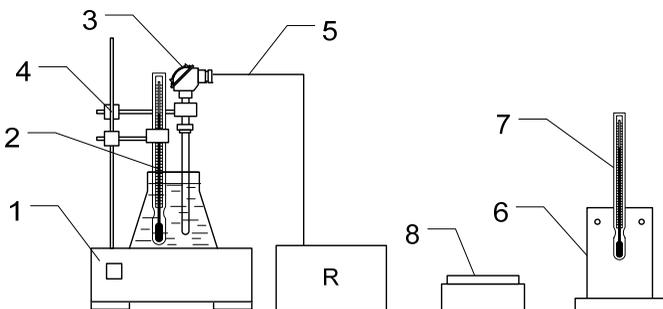


Рис. 3.2. Схема лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы:

1. Собрать измерительную цепь «термопреобразователь сопротивления – вторичный прибор». Закрепить на штативе в держателе поверяемый ТС и поместить его в сосуд Дюара с тающим льдом. Снять и занести показания температуры рабочего тела в сосуде Дюара по термометру 7 (t_d) и показания сопротивления термометра, определенные по прибору 8, показание атмосферного давления по барометру в табл. 3.3. Повторить измерения 3 раза с интервалом времени 1–2 минуты.

2. Переместить установленный на штативе в держателе термометр сопротивления в термостат. Включить в электрическую сеть термостат, нажать кнопку «Вкл.» и задать на регуляторе температуры термостата 100 °С. При достижении температуры рабочего тела термостата 100 °С занести показания температуры рабочего тела термостата по термометру 2 (t) и показания сопротивления термометра, определенные по прибору 8 в табл. 3.3. Повторить измерения 3 раза с интервалом времени 1–2 минуты.

3. После этого выключить оборудование из электросети и разобрать измерительную схему, рассчитать данные и заполнить табл. 3.4 и 3.5.

Определить отклонения сопротивления R_{0cp} термопреобразователя от номинального значения R_0 при температуре 0 °С из выражения

$$\Delta R = R_{0cp} - R_0$$

и сравнить полученное значение отклонения ΔR с данными из табл. 3.1.

Сравнить полученное значение t_d с показанием термометра 2 и действительным значением температуры кипения воды t_a , рассчитанным по формуле

$$t_a = 100 + 28,012 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right),$$

где P – атмосферное давление по барометру (Па);

P_0 – номинальное атмосферное давление $P_0 = 101325,6$ Па (Па).

Определить значение сопротивления термопреобразователя R_{100} при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ из выражения

$$R_{100} = R_{t_{\text{в,ср}}} + \frac{R_{t_{\text{в,ср}}} + R_{0\text{ср}}}{t_{\text{к}}}(100 - t_{\text{к}}),$$

где $R_{t_{\text{в,ср}}}$ – среднее значение сопротивления термопреобразователя при температуре паров кипящей воды $t_{\text{в}}$, Ом;

$t_{\text{в}}$ – температура паров и кипящей воды, $^{\circ}\text{C}$.

Определить величину отношения термопреобразователя из отношения

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_{0\text{ср}}},$$

где R_{100} – значение сопротивления термопреобразователя при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ из выражения (3.1), Ом;

$R_{0\text{ср}}$ – среднее сопротивление термопреобразователя при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ом. Сравнить полученное значение отклонения W_{100} от номинального с допустимыми отклонениями из табл. 3.2.

Определить коэффициент α интерполяционной формулы, для зависимости медного термометра расширения от температуры, из соотношения

$$\alpha = \frac{R_{t_{\text{в}}} - R_0}{R_0 \cdot t_{\text{в}}},$$

или

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100},$$

где $R_{t_{\text{в}}}$ – значение сопротивления термопреобразователя, при температуре кипящей воды $t_{\text{в}}$, Ом;

$t_{\text{в}}$ – температура кипящей воды, $^{\circ}\text{C}$;

R_{100} и R_0 – значение сопротивления термопреобразователя при температуре 100 °С и 0 °С, Ом.

Определив коэффициент α , вычислить по формуле сопротивления R_t :

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

для значений температуры t , кратных 20 °С, и на основании полученных данных составить градуировочную таблицу. Сравнить полученные данные с номинальными (заводскими) и сделать вывод.

Таблица 3.1

Допустимые отклонения номинального сопротивления R_0 при 0 °С

Тип термопреобразователя	Допустимые отклонения номинального сопротивления R_0 при 0 °С, %, для классов		
	1	2	3
ТСП	±0,05	±0,1	±0,2
ТСМ	–	±0,1	±0,2

Таблица 3.2

Допустимые отклонения номинального сопротивления R_{100}/R_0

Тип термопреобразователя	Допустимые отклонения номинального сопротивления R_{100}/R_0 для классов		
	1	2	3
ТСП	1,391 ± 0,0007	1,391 ± 0,01	–
ТСМ	–	1,426 ± 0,001	1,426 ± 0,002

Таблица 3.3

Таблица измерений и результатов

Тип термопреобразователя	τ , мин	0	2	4	6	Среднее значение
	R_0 , Ом					
	t_0 , °C					
	R_{100} , Ом					
	t_B , °C					
	B , Па					
	t_a , °C					

Таблица 3.4

Таблица измерений и результатов

Тип термопреобразователя	$\Delta t = 100 - t_B$, °C	R_{0cp}	ΔR , Ом	R_{100}	W_{100}	α

Таблица 3.5

Таблица результатов

Температура среды, t °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Расчетная величина сопротивления термопреобразователя R_t , Ом										

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ (ИНЕРЦИОННОЙ) ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: определение динамических (инерционных) характеристик и коэффициентов передачи термоэлектрических термопреобразователей.

Основные положения

При проведении измерений существует необходимость дистанционной передачи данных о температуре различных технологических устройств. Для измерения и дистанционной передачи температуры используют измерительную цепь, состоящую из датчика (элемента, находящегося под воздействием измеряемой температуры), импульсной линии (элемента, передающего на какое-то расстояние информацию об изменении под действием температуры сопряженного с ней свойства датчика), прибора-преобразователя, однозначно преобразующего получаемую от датчика информацию в удобный для дальнейшего использования сигнал.

Наибольшее распространение в промышленности получили *термоэлектрический, терморезисторный и манометрический* методы измерения температур.

Термоэлектрический метод измерения температуры осуществляется при помощи чувствительного элемента термопары, рабочий спай которой должен находиться в точке замера температуры. К достоинствам термоэлектрических термометров следует отнести достаточно высокую степень точности, широкий диапазон измеряемых температур, возможность осуществления дистанционной передачи информации, автоматической записи показаний и использования в автоматических системах регулирования.

Обеспечение наиболее высокого качества контроля и регулирования температур достигается в том случае, если термопреобразователь обладает хорошими **статическими** и **динамическими характеристиками**.

Статическая характеристика термоэлектрических термопреобразователей (термопары) представляет собой зависимость

термо-ЭДС от температуры горячего спая при постоянной или равной 0 °С температуре холодного спая (рис. 4.1). Для большинства промышленных термопар эти характеристики фактически линейны.

Статические свойства термопар (рис. 4.1) зависят от крутизны характеристики γ . Чем круче характеристика термопары, тем выше ее чувствительность к изменению температуры, т. е. тем большую ЭДС развивает термопара при одном и том же диапазоне изменения температур.

Из термопар, приведенных на рис. 4.1, наиболее чувствительной будет хромель-копелевая термопара. Статические свойства термопар зависят от материала термоэлектрических проводников.

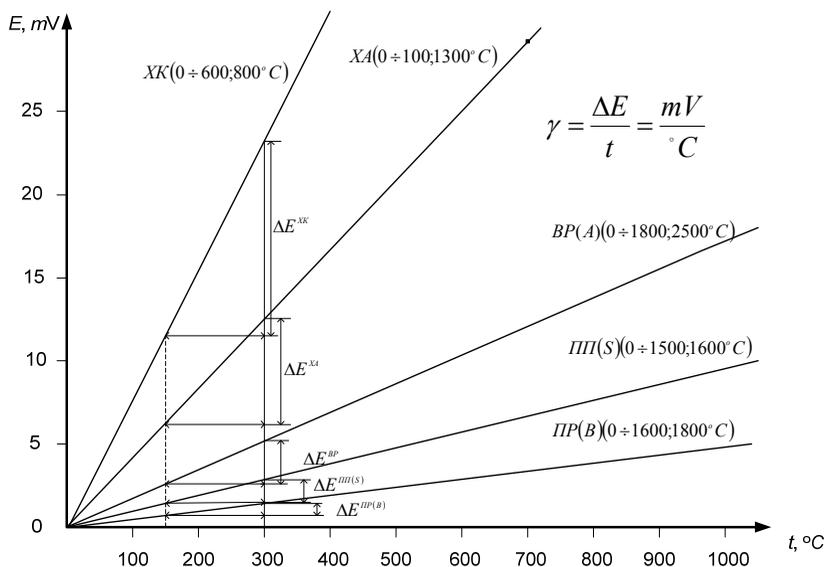


Рис. 4.1. Статические характеристики термоэлектрических термопреобразователей

Динамические свойства термоэлектрических термопреобразователей (инерционность) характеризуются показателем тепловой инерции (постоянной времени) (рис. 4.2). С точки зрения исследования динамических свойств элементов регулирования, в том числе и термопреобразователей, очень важно различать их по характеру переходных процессов, а не по конструктивному выполнению.

За время dt термопреобразователь нагреется на $d\theta$, °C, и получит количество тепла

$$dQ = cm \cdot d\theta, \quad (4.3)$$

где c – теплоемкость материала, из которого изготовлен корпус термопреобразователя;

m – масса материала корпуса.

Нагретый корпус термопреобразователя сам излучает тепловую энергию $Q_{\text{и}}$, потери энергии на излучение за время dt будут равны

$$Q_{\text{и}} = \delta F(\theta - \theta_{\text{вн}}), \quad (4.4)$$

где δ – коэффициент излучения;

F – общая поверхность корпуса термопреобразователя, м^2 ;

θ – температура измеряемой среды, °C;

$\theta_{\text{вн}}$ – температура в помещении, °C.

Через время t температура корпуса термопреобразователя θ сравняется с температурой рабочего тела $\theta_{\text{рт}}$ и наступит равновесный режим:

$$E(mV)_{\text{pp}} = \gamma \cdot \theta_{\text{рт}}. \quad (4.5)$$

Термическая ЭДС будет равна $E(mV)_{\text{pp}}$.

Исходя из выражений (4.1)–(4.5) дифференциальное уравнение термопреобразователя можно записать в общем виде как

$$T \frac{dE_{\text{вых}}}{dt} + E_{\text{вых}} = k\theta_{\text{рт}}. \quad (4.6)$$

Кривая разгона термопреобразователя как аperiодического звена может быть построена по уравнению, которое является решением дифференциального уравнения (4.6):

$$E(t)_{\text{вых}} = k \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где k – коэффициент передачи, $\text{мВ}/^\circ\text{C}$;

T – постоянная времени, которая представляет собой время, через которое входная величина $E(t)_{\text{вых}}$ (ЭДС термопары) достигла бы установившегося значения, если бы ее изменение протекало с постоянной скоростью, равной скорости изменения в начальный момент времени. Это есть проекция на ось времени касательной к кривой из начала координат до пересечения с касательной к кривой при установившемся значении теплового равновесия.

Процесс нагревания или охлаждения термопары можно разделить на три стадии (рис. 4.2).

1. *Дорегулярный режим* (начальный участок), при котором еще не произошло выравнивание температуры между корпусом и термоэлектродом за счет теплоизолирующих свойств материала, находящегося между ними (воздух, изолятор и т. д.).

2. *Регулярный режим*, при котором тепло- и электроизоляционные материалы беспрепятственно передают все тепло от корпуса к электроду. С этого момента начинает быстро расти по времени ЭДС термопары.

3. *Режим теплового равновесия* наступает через некоторое время, когда подведенное тепло с $d\theta$ становится равным потерям тепла на излучение $Q_{\text{н}}$.

Для избежания погрешностей при измерении температуры горячих сред с помощью термопар, термопреобразователь должен находиться далеко в зоне теплового равновесия (за участком до регулярного режима).

Поэтому постоянная времени T является основной величиной, характеризующей динамические свойства термопреобразователей, определяя их инерционность.

Термопреобразователи различают по показателям тепловой инерции:

- малоинерционные (МИ) до 5 с;
- среднеинерционные (СИ) до 60 с;
- инерционные (БИ) до 180 с.

Термопреобразователи со значениями тепловой инерции более 180 с не нормируются. Термопары СИ и БИ имеют более массивные чехлы и лучше защищены от разрушающих воздействий.

В государственных стандартах на технические термопреобразователи оценка инерционности производится по времени, в течение которого ЭДС термопары, перенесенной из воды комнатной темпе-

ратуры в кипящую воду, не доходит до значения, соответствующего 100 °С, на 10 % от полного интервала измерения температуры воды, т. е. примерно на 8 °С.

Динамические свойства термопары зависят от конструктивного оформления (массы корпуса, применяемых тепло- и электроизоляционных материалов и т. д.). Термопары ХА и ХК являются аperiodическими звеньями, термопара ХК имеет запаздывание, равное времени прогрева теплоизоляции, τ – постоянная запаздывания. Таким образом, данная термопара представляет собой два последовательно соединенных звена – аperiodическое и запаздывающее.

Порядок выполнения работы

Схема лабораторной установки представлена на рис. 4.3. Лабораторная установка состоит из термостата со стеклянной колбой 1, термометра 2, штатива с держателем 4, термопары 3, компенсационных проводов 5, термометра 7, показывающего температуру в сосуде Дюара 6, соединительных проводов 8, вольтметра В-5-40 9, электронного секундомера 10, барометра 11.

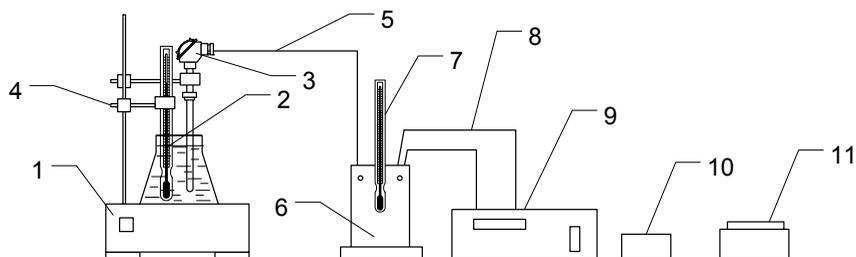


Рис. 4.3 Схема лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы:

1. Включить в электрическую сеть термостат, нажать кнопку «Вкл.» и задать на регуляторе температуры нагрев в 100 °С. Установить на штативе в держателе термопару. Произвести запись показаний термометра 7 (t_{xc}) и показаний термо-ЭДС, определенных с помощью вольтметра В-5-40, полученные результаты занести в табл. 4.1.

2. При достижении температуры рабочего тела термостата 100 °С установленную на штативе в держателе термопару погрузить

в термостат. Произвести запись показаний термометров 2 (t_b) и 7 (t_{xc}) и показаний термо-ЭДС, определенных с помощью вольтметра В-5-40. Запустить электронный секундомер. Полученные результаты занести в табл. 4.2. Далее снимать показания с интервалом в 4 секунды;

3. После выхода на постоянные показания измерения температуры (равновесный режим), выключить оборудование и разобрать измерительную схему.

Рассчитать суммарную термо-ЭДС рабочего тела (воды) E'_{MB} с учетом найденного значения поправки E_{xc} на температуру холодного спая по формуле (4.7).

Определить действительную температуру кипения воды t_a , рассчитав по формуле (4.8). Сравнить измеренное термометром значение t_b с действительным значением температуры кипения воды t_a . По статическим характеристикам определить чувствительность термоэлектрических термометров градуировок ХК, ХА по формуле (4.9). Рассчитать коэффициент передачи термопары по формуле (4.10).

Рассчитать суммарную термо-ЭДС воды E'_{MB} с учетом найденного значения поправки E_{xc} на температуру холодного спая и показаний прибора l_0 по формуле

$$E'_{MB} = E_{MB} + E_{xc}. \quad (4.7)$$

По найденному значению E'_{MB} определить температуру воды t_b по градуировочной таблице. Сравнить полученное значение t_b с показанием термометра 2 и действительным значением температуры кипения воды t_a , рассчитанным по формуле

$$t_a = 100 + 28,012 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right), \quad (4.8)$$

где P – атмосферное давление по барометру (Па);

P_0 – номинальное атмосферное давление, $P_0 = 101325,6$ Па.

По статическим характеристикам определить чувствительность термоэлектрических термометров градуировок ХК, ХА по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E_1^{100} - E_n^{100}}{t_1^{100} - t_n^{100}}, \text{ мВ/}^\circ\text{С}, \quad (4.9)$$

где $\Delta E = E^{100}_1 - E^{100}_n$ – приращение входного параметра датчика в милливольтгах при измерении температуры кипящей воды;

$\Delta t = t^{100}_1 - t^{100}_n$ – приращение температур, вызвавшее изменение термо-ЭДС на величину ΔE при измерении температуры кипящей воды, °С.

Рассчитать коэффициент передачи термопары по формуле (4.10)

$$k = \frac{E'_{\text{МВ}} - \Delta E}{t_a} = \frac{E_{\text{д}}}{t_a}, \text{ мВ/}^\circ\text{С}, \quad (4.10)$$

где $E_{\text{д}}$ – показание термо-ЭДС, соответствующее t_a °С, мВ;

t_a – действительное значение температуры кипения воды при данном атмосферном давлении, °С.

Построить по полученным данным графическую зависимость изменения динамической характеристики термо-ЭДС для типов термопар ХК, ХА. По построенным графикам определить для обеих термопар постоянную времени $T(c)$, а для термопары ТХК – и время запаздывания $\tau(c)$.

Таблица 4.1

Таблица измерений и результатов

№п/п	Тип ТП	τ , с	t_b , °С	$t_{\text{ХС}}$, °С	$E_{\text{ХС}}$, мВ	$E_{\text{МВ}}$, мВ	$E'_{\text{МВ}}$, мВ	t' , °С

Таблица 4.2

Таблица результатов

№п/п	Тип ТП	P , Па	t_a , °С	$E_{\text{д}}$, мВ	ΔE , мВ	γ , мВ/°С	k , мВ/°С

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ИНФРАКРАСНОГО ПИРОМЕТРА

Цель работы: изучение принципа действия, конструкции и методики проведения измерений инфракрасным пирометром

Основные положения

Пирометр – бесконтактный термометр, действие которого основано на измерении теплового излучения. Серийно выпускаемые технические пирометры применяются для измерения температур в диапазоне от -50 до 3000 °С.

Пирометры обладают *следующими преимуществами* по сравнению с приборами, измеряющими температуру контактными методами:

- имеют принципиально неограниченный верхний температурный предел измерения;
- обеспечивают возможность измерения температур излучателей, находящихся на большом расстоянии от пирометра;
- не искажают температурное поле объекта измерения;
- применяются для измерения температур газовых потоков при больших скоростях.

Однако контактные методы измерения позволяют обеспечить более высокую точность измерения, чем бесконтактные методы.

Все тела излучают электромагнитные волны различной длины λ или частоты ν .

Электромагнитное излучение, возбуждаемое тепловым движением молекул, называют *тепловым излучением*. Тепловое излучение имеет место при температурах до 4000 °С как результат колебательного или вращательного движения молекул. При более высоких температурах излучение вызывается в основном процессами *диссоциации* и *ионизации*.

Величины и постоянные, применяемые в пирометрии, приведены в табл. 5.1.

Абсолютно черным телом (АЧТ) называется тело, поглощающее все падающее на него излучение.

Таблица 5.1

Пирометрические величины и постоянные

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

Серым телом называют тело, коэффициент поглощения которого не равен 1, но не зависит от длины волны и температуры.

О температуре нагретого тела можно судить на основании изменения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура

тела, тем больше энергии оно излучает. Тепловые лучи испускаются всеми нагретыми физическими телами, которые при температурах около 500–600 °С начинают испускать излучение, видимое человеческим глазом, причем яркость свечения нагретых тел быстро возрастает с повышением температуры.

Видимое человеческим глазом электромагнитное излучение, называемое светом, представляет собою лишь весьма узкий диапазон спектра шириной 0,35 мкм с длинами волн от 0,40 до 0,75 мкм. Невидимые лучи с большей длиной волны (более 0,75 мкм) относятся к инфракрасному участку спектра излучения, охватывающему диапазон от 0,75 до 400 мкм, который делится на несколько поддиапазонов (табл. 5.2), за которым инфракрасный участок спектра постепенно переходит в диапазон радиоволн. Невидимые лучи с меньшей длиной волны (менее 0,40 мкм) относятся к ультрафиолетовому участку спектра излучения.

Таблица 5.2

Поддиапазоны инфракрасного спектра

Длина волн (мкм)	Название диапазона
0,76–1,5	Ближнее инфракрасное излучение
1,5–5,5	Коротковолновое инфракрасное излучение
5,6–25	Длинноволновое инфракрасное излучение
25–100	Дальнее инфракрасное излучение

Для измерения температуры используют в основном диапазон инфракрасных и видимых лучей, для этого разработаны пирометры следующих типов:

- *пирометр частичного излучения (ПЧИ) (квазимонохроматический пирометр)* – измеряет энергию в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
- *пирометр спектрального отношения (ПСО)* – измеряется отношение энергии фиксированных участков спектра;
- *пирометр суммарного (полного) излучения (ПСИ)* – измеряется полная энергия излучения.

В зависимости от типа пирометра различаются *яркостная, цветовая и радиационная температуры*, по которым проводится измерение температуры.

Яркостной температурой реального тела $T_{\text{я}}$ называют температуру, при которой плотность потока спектрального излучения абсолютно черного тела равна плотности потока спектрального излучения реального тела для той же длины волны (или узкого интервала спектра) при действительной температуре $T_{\text{д}}$.

Цветовой температурой реального тела $T_{\text{ц}}$ называют температуру, при которой отношения плотностей потоков излучения абсолютно черного тела для двух длин волн λ_1 и λ_2 равно отношению плотностей потоков излучений реального тела для тех же длин волн при действительной температуре $T_{\text{д}}$.

Радиационной температурой реального тела $T_{\text{р}}$ называют температуру, при которой полная мощность абсолютно черного тела равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре $T_{\text{д}}$.

Развитием методики использования бесконтактных средств измерения является *тепловидение*.

Тепловидение – это направление в технических измерениях, изучающее физические основы, методы и приборы, обеспечивающие возможность наблюдения слабонагретых объектов.

Приборы, работающие в этом направлении называются **тепловизорами (термографами)**. Тепловизоры относятся к оптико-электронным приборам пассивного типа, работающим в инфракрасном диапазоне спектра излучения.

Принцип действия: радиометрическое измерение температуры с пространственным разрешением и преобразованием температурного поля в тепловизионное изображение с цветовым контрастом, позволяющее измерять градиенты температуры, температуру тела, объекта, среды.

На экране тепловизора видны значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения тепловизора, отображенные согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).

При проведении измерений температуры инфракрасным пирометром вводятся следующие понятия:

- **поле зрения прибора** – измеряемый диаметр объекта, с поверхности которого прибор принимает энергию инфракрасного излучения;
- **измеряемый диаметр объекта** – величина определяется показателем визирования и зависит от расстояния до инфракрасного

термометра. Измеряемый диаметр объекта равен произведению показателя визирования на расстояние до объекта;

- **минимальный измеряемый диаметр** – наименьший диаметр объекта, который может быть измерен при данном фокусном расстоянии и размере приемника. При приближении к объекту вплотную измеряемый диаметр увеличивается до размеров входного зрачка прибора.

Измеренная пирометром температура будет неверна, если размер объекта меньше поля зрения, объект, температуру которого должны были измерить, не заполнил все *поле зрения прибора*, прибор принимает излучение от других объектов, которое оказывает влияние на точность проводимого измерения (рис. 5.1).

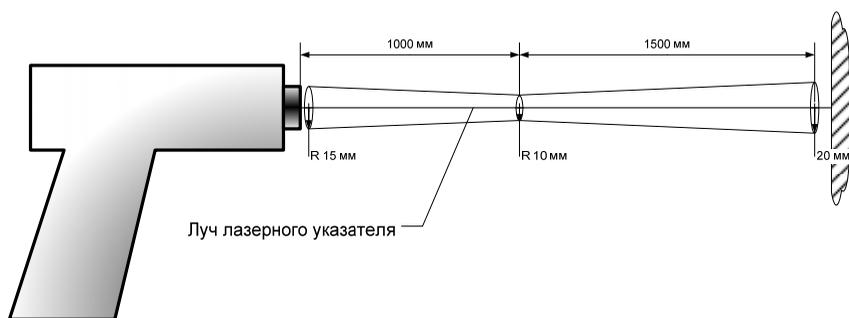


Рис. 5.1. Поле зрения инфракрасного термометра

Порядок выполнения работы

Лабораторная установка (рис. 5.2) состоит из поверхности 1 со встроенными точечными источниками температуры с нанесенной координатной сеткой, измерительных приборов, инфракрасного термометра 2 и контактного термоэлектрического термометра 3 для измерения температуры плоских поверхностей.

В данной лабораторной работе необходимо провести два измерения температуры. *Первое* – инфракрасным термометром, *второе* – измерить температуру в этой же точке поверхности контактным термоэлектрическим термометром. Полученные данные занести в табл. 5.3.

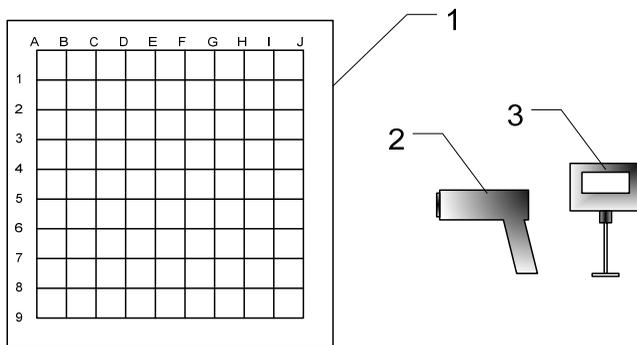


Рис. 5.2. Схема лабораторной установки

Произвести обработку полученных данных и определить абсолютную погрешность измерения температуры (Δt):

$$\Delta t = t_{\text{КТ}} - t_{\text{ИК}},$$

где $t_{\text{КТ}}$ и $t_{\text{ИК}}$ – температуры, измеренные контактным и инфракрасным термометром, °С.

Полученные при поверке значения абсолютной погрешности сравниваются с величиной допускаемой погрешности:

$$\Delta_{\text{д}} = \frac{t_{\text{ВП}} - K}{100},$$

где $t_{\text{ВП}}$ – верхний предел измерения инфракрасным термометром по паспорту, °С;

K – класс точности инфракрасного термометра по паспорту.

Таблица 5.3

Таблица измерений

№ п/п	Измерения		Погрешность прибора	
	контактного	ИК	абсолютная	допускаемая
	$t_{\text{КТ}}, \text{°C}$	$t_{\text{ИК}}, \text{°C}$	Δt	$\Delta_{\text{д}}$

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТНЫХ МАНОМЕТРОВ И ДИФМАНОМЕТРОВ

Цель работы: изучение принципа действия и конструкции жидкостных манометров и дифманометров, освоение методики работы с ними.

Основные положения

В жидкостных манометрах измеряемое давление или разность давлений уравнивается давлением столбами жидкости. **Принцип действия** основан на использовании сообщающихся сосудов, в которых уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними, а при неравенстве занимают такое положение, когда избыточное давление в одном из сосудов уравнивается гидростатическим давлением избыточного столба жидкости в другом.

Как правило, в *жидкостных манометрах* имеется видимый уровень рабочей жидкости, по которому производится непосредственное снятие показаний, они используются в лабораторной практике и при проведении промышленных испытаний.

В *жидкостных дифманометрах* уровень рабочей жидкости непосредственно не наблюдается. Изменение последнего вызывает перемещения поплавка или изменение характеристик другого устройства, обеспечивающих либо непосредственное показание измеряемой величины, с помощью отсчетного устройства, либо преобразование и передачу ее значения на расстояние.

Двухтрубные жидкостные манометры. Для измерения давления и разности давлений применяют двухтрубные манометры и дифманометры с видимым уровнем, называемые U-образными жидкостными манометрами. Принципиальная схема такого манометра представлена на рис. 6.1. Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1, 2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреплена шкальная пластинка 4. Трубки заполняются рабочей жидкостью до нулевой отметки. В трубку 1 подается измеряемое давление, трубка 2 сообщается с атмосферой. При измерении разности давлений к обеим трубкам подводятся измеряемые давления.

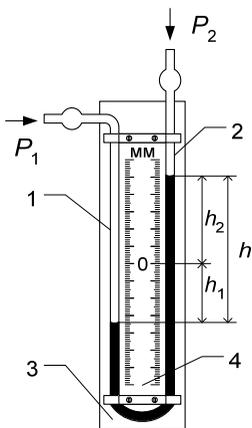


Рис. 6.1. Схема U-образного манометра

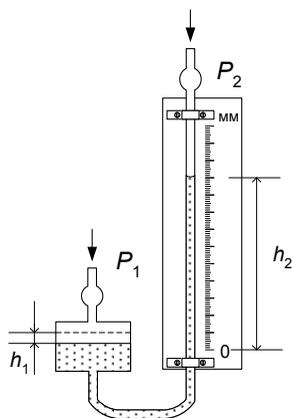


Рис. 6.2. Схема однотрубного манометра

Столб жидкости высотой h уравнивает разность давлений

$$p_1 - p_2 = \rho gh; \quad h = \frac{1}{\rho g} (p_1 - p_2), \quad (6.1)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м^3 ;

g – местное ускорение свободного падения, м/с^2 .

Функцию чувствительного элемента, воспринимающего изменения измеряемой величины, выполняет рабочая жидкость (вода, ртуть, спирт, трансформаторное масло). Выходной величиной является разность уровней, входной – давление или разность давлений. Чувствительность (коэффициент передачи) манометра с увеличением плотности рабочей жидкости снижается, поскольку

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta P} = \frac{1}{\rho g}.$$

Если плотность среды над рабочей жидкостью соизмерима с плотностью последней, то выражение (6.1) видоизменяется:

$$p_1 - p_2 = gh(\rho_1 - \rho_2) = g(\rho_1 - \rho_2)(h_1 + h_2), \quad (6.2)$$

где ρ_1, ρ_2 – соответственно плотности рабочей жидкости и среды над ней.

Высота столба h определяется как сумма высот h_1 и h_2 . Удвоение высоты h_1 либо h_2 недопустимо, так как из-за непостоянства внутреннего сечения стеклянных трубок 1, 2 высоты h_1 , h_2 могут различаться. Для исключения влияния капиллярных сил в манометрах используются стеклянные трубки с внутренним диаметром 8–10 мм. Если рабочей жидкостью служит спирт, то внутренний диаметр трубок может быть снижен.

Двухтрубные манометры с водяным заполнением используются для измерения давления, разрежения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в диапазоне до ± 10 кПа. При заполнении манометра ртутью пределы измерения расширяются до 0,1 МПа, при этом измеряемой средой могут быть вода, неагрессивные жидкости и газы.

При использовании жидкостных манометров для измерения разности давлений сред, находящихся под статическим давлением до 5 МПа, в конструкцию приборов вводятся дополнительные элементы, предназначенные для защиты прибора от одностороннего статического давления и проверки начального положения уровня рабочей жидкости.

Согласно выражению (6.2) источниками погрешностей двухтрубных манометров являются отклонения от расчетных значений местного ускорения свободного падения, плотностей рабочей жидкости и среды над ней, ошибки в считывании высот h_1 и h_2 .

Местное ускорение свободного падения рассчитывается по формуле

$$g = g_n \left[1 - 0,0026 \cos(2\Delta\varphi) - 2 \cdot 10^{-7} H \right],$$

где g_n – нормальное ускорение свободного падения, равное $9,80665 \text{ м/с}^2$;

$\Delta\varphi$ – отклонение географической широты от широты 45° , соответствующее нормальному ускорению свободного падения;

H – высота над уровнем моря, м.

Плотности рабочей жидкости и среды даются в таблицах теплотехнических свойств веществ в зависимости от температуры и давления. Погрешность считывания разности высот уровней рабочей жидкости зависит от цены деления шкалы. Без дополнительных оптических устройств при цене деления 1 мм погрешность считывания разности уровней составляет ± 2 мм с учетом погрешности нанесения шкалы. При использовании дополнительных устройств

для повышения точности считывания h_1, h_2 необходимо учитывать расхождение температурных коэффициентов расширения шкалы, стекла и рабочего вещества. Разность высот уровней приводят к 0°C с использованием формулы

$$h = h_t [1 - (\beta - \alpha)t], \quad (6.3)$$

где β – коэффициент видимого расширения рабочего вещества в стекле, ртути ($\beta = 0,00018 \text{ 1/}^\circ\text{C}$);

α – температурный коэффициент линейного расширения материала шкалы, для латуни $\alpha = 0,000019 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Однотрубные манометры (чашечный манометр). Чашечный манометр (рис. 6.2) является разновидностью U-образного, одно из колен чашечного манометра выполнено в виде сосуда (чашки), диаметр которого больше диаметра трубки, представляющей собой другое колено. Полость с измеряемым давлением (больше атмосферного) соединяется с чашкой, а трубка соединяется с атмосферой. Так как площадь сечения чашки больше площади сечения трубки, жидкость под действием давления в чашке опускается на высоту h_1 , которая меньше высоты подъема в трубке h_2 .

Объем жидкости, вытесненной из широкого сосуда, равен объему жидкости, поступившей в измерительную трубку,

$$h_1 F = h_2 f, \quad h_1 = \frac{h_2 f}{F},$$

где F, f – площади поперечного сечения измерительной трубки и широкого сосуда.

Если $f \ll F, h_1 \ll h_2$ и $F/f > 400$, то изменением уровня в широком сосуде пренебрегают и при измерении учитывается только изменение уровня в измерительной трубке. Если для повышения точности измерения необходимо учесть это изменение, то шкала градуируется в единицах давления в соответствии с уравнением

$$p_1 - p_2 = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g h_2 \left(1 + \frac{f}{F} \right).$$

Измерение в однотрубных манометрах высоты одного столба рабочей жидкости приводит к снижению погрешности считывания, которая с учетом погрешности градуировки шкалы не превышает ± 1 мм при цене деления 1 мм.

Погрешность измерений однотрубных манометров зависит от отклонения от расчетного значения ускорения свободного падения, плотности рабочей жидкости и среды над нею, температурных расширений элементов прибора, эти погрешности являются общими для всех жидкостных манометров и рассчитываются по методике, рассмотренной выше.

Минимальный диапазон измерения однотрубных манометров с водяным заполнением составляет 1,6 кПа (160 мм вод. ст.), при этом приведенная погрешность измерения не превышает $\pm 1\%$. Конструктивное выполнение манометров зависит от статического давления, на которое они рассчитаны.

Микроманометры. Для измерения давления и разности давлений до 3 кПа (300 кгс/м^2) используются микроманометры, которые являются разновидностью однотрубных манометров, снабженные специальными приспособлениями для уменьшения цены деления шкалы либо для повышения точности считывания высоты уровня за счет использования оптических или других устройств. Широко применяемыми лабораторными микроманометрами являются микроманометры типа ММН с наклонной измерительной трубкой (рис. 6.3).

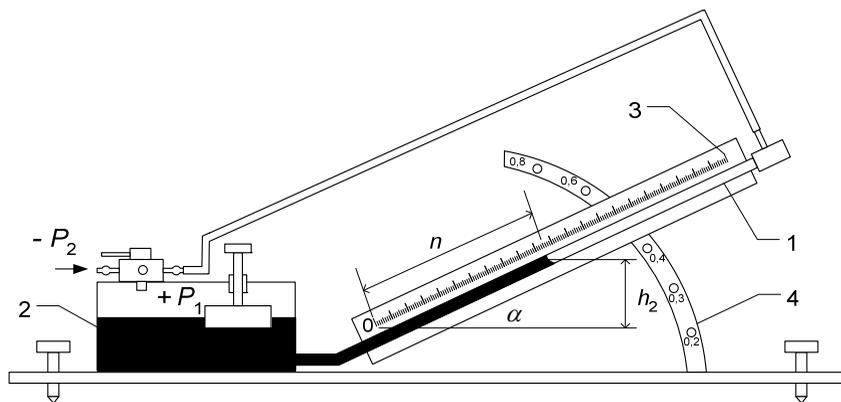


Рис. 6.3. Схема микроманометра ММН

На рис. 6.3 кронштейн 3 с измерительной трубкой 1 крепится на секторе 4 в одном из пяти фиксированных положений, которым соответствуют $k = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8$ и пять диапазонов измерения прибора от 0,6 кПа (60 кгс/м^2) до 2,4 кПа (240 кгс/м^2).

Давление измеряется по длине столбика рабочей жидкости n в измерительной трубке l , имеющей угол наклона α . Исходя из равенства объемов рабочей жидкости, вытесненной из широкого сосуда 2 в измерительную трубку l , следует

$$h_1 F = h_2 f, \quad h_1 = \frac{nf}{F},$$

где h_1 – изменение уровня в широком сосуде;

F, f – площади поперечного сечения широкого сосуда и трубки.

Так как $h_2 = n \cdot \sin \alpha$,

$$p_1 - p_2 = \rho g (h_1 + h_2) = \rho g n \left(\sin \alpha + \frac{f}{F} \right). \quad (6.4)$$

В качестве рабочей жидкости обычно используют этиловый спирт ρ_p и при нормальном ускорении свободного падения g_n все сомножители при n в выражении (6.4) обозначают одним коэффициентом k , изменяющимся от 0,2 до 0,8. При изменении плотности спирта вследствие изменения температуры или использовании рабочей жидкости с плотностью $\rho \neq \rho_p$, а также при местном ускорении g , отличном от g_n , измеряемая разность давлений рассчитывается по показаниям микроманометра n по следующей формуле:

$$p_1 - p_2 = \frac{k n \rho g}{\rho_p g_n}.$$

Приведенная погрешность измерения не превышает 0,5 %. Цена деления при $k = 0,2$ составляет 2 Па ($0,2 \text{ кгс/м}^2$), дальнейшее снижение цены деления, связанное с уменьшением угла наклона измерительной трубки, ограничено снижением точности считывания положения уровня рабочей жидкости из-за растягивания мениска.

Более точными приборами являются микроманометры типа ММ, называемые компенсационными. Погрешность считывания высоты уровня в этих приборах не превышает $\pm 0,05$ мм в результате использования оптической системы для установления начального

уровня и микрометрического винта для измерения высоты столба рабочей жидкости, уравнивающего измеряемое давление или разность давлений.

Порядок выполнения работы

Лабораторная установка (рис. 6.4) состоит из микроманометра ММН-240 1, сильфонного пресса 2, трехходового крана 3, тройника 4, U-образного водяного манометра 5, барометра 6.

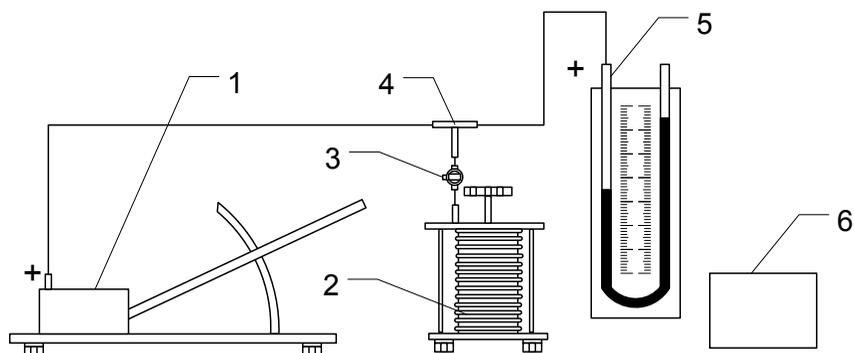


Рис. 6.4. Схема лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы ознакомьтесь с общими сведениями по измерению давления и жидкостными манометрами, после чего выполнить следующие действия:

1. Собрать схему, приведенную на рис. 6.4. Установить микроманометр ММН-240 по уровням в нулевое положение.
2. Рассчитать значение коэффициента k (коэффициент угла наклона трубки микроманометра) для проведения измерений по формуле

$$k = \frac{\Delta p_n}{l_{\max}},$$

где Δp_n – предельный номинальный перепад, на который рассчитан U-образный водяной манометр, мм вод. ст;

l_{\max} – длина шкалы микроманометра, 250 мм.

Округлить полученное значение до ближайшего значения коэффициента, указанного на дуге микроманометра.

3. Установить трехходовой кран в положение 1, вращая рукоятку сильфонного пресса против хода часовой стрелки, полностью растянуть сильфон, установить трехходовой кран в положение 2.

5. Создавая сильфонным прессом давление ступенями, произвести по шкале U-образного водяного манометра значение, результаты записать в табл. 6.1 и 6.2.

6. Произвести аналогичные измерения при понижении давления от Δp_n до нуля при тех же значениях давления. Результаты записать в табл. 6.1, 6.2. Разобрать схему.

Действительное значение измеряемого давления p_i , Па, по показаниям образцового микроманометра ММН-240 определяется по формуле

$$p_i = g_m \cdot \rho_{ж} \cdot k(l_i - l_0),$$

где l_i – соответственно i -е показание высоты столба жидкости в микроманометре, м;

l_0 – начальное показание высоты столба жидкости в микроманометре, мм;

k – коэффициент угла наклона трубки микроманометра;

$\rho_{ж}$ – плотность спирта в микроманометре, $\rho_{ж} = 809,5 \text{ кг/м}^3$;

g_m – местное ускорение свободного падения, м/с^2 .

Рассчитать местное ускорение свободного падения g_m с учетом географической широты местности нахождения φ° и высоты над уровнем моря, м (для г. Минска $\varphi^\circ = 54^\circ$), из выражения

$$g = g_n \left[1 - 0,0026 \cos(2\Delta\varphi) - 2 \cdot 10^{-7} H \right],$$

где g_n – нормальное ускорение свободного падения, равное $9,80665 \text{ м/с}^2$;

$\Delta\varphi$ – отклонение географической широты от широты 45° , соответствующее нормальному ускорению свободного падения;

H – высота над уровнем моря, м.

Выразить измеренное с помощью U-образного водяного манометра p_i^U давление и разряжение в Па по формуле

$$p_i^U = g_n \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot h,$$

где h – разность уровней рабочей жидкости, м;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность рабочей жидкости в манометре $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$;

g_n – нормальное ускорение свободного падения, равное $9,80665 \text{ м/с}^2$.

При выполнении измерений с помощью жидкостных приборов необходимо учитывать дополнительные погрешности, обусловленные влиянием температуры и ускорения свободного падения. При необходимости эти погрешности могут быть исключены путем введения соответствующих поправок в показания прибора, то есть приведением его показания к нормальным условиям (t_0 и g_n). При этом длину шкалы жидкостного прибора приводят к $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, так как миллиметровые деления шкалы наносят и поверяют при этой температуре.

Если h_t – высота столба рабочей жидкости, отсчитанная при температуре t , то высота столба жидкости h_0 при температуре $t_0 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ для воды ($t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ для ртути) и $t_{20} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ для шкалы равна

$$h_0 = h_t \left\{ 1 - [\beta(t - t_0) - \alpha(t - t_{20})] \right\}.$$

Приведение отсчитанной высоты столба рабочей жидкости c_t при температуре t к указанной температуре значения поправки, как это следует из выражения (6.3), определяется по формуле

$$c_t = h_0 - h_t = h_t [\alpha(t - t_{20}) - \beta(t - t_0)],$$

где β – средний коэффициент расширения рабочей жидкости в области температур, близких к $20 \text{ }^\circ\text{C}$, для воды $\beta = 0,0002 \text{ К}^{-1}$, для этилового спирта $\beta = 0,0011 \text{ К}^{-1}$;

α – коэффициент линейного расширения материала шкалы, для латуни равный $\alpha = 0,000019 \text{ К}^{-1}$, для стали $\alpha = 0,000012 \text{ К}^{-1}$, для стекла $\alpha = 0,000008 \text{ К}^{-1}$.

Для определения высоты столба жидкости h_n , соответствующей нормальному ускорению свободного падения g_n , необходимо высоту столба h_t , отсчитанную при местном ускорении свободного падения g , умножить на отношение g/g_n , тогда значение поправки для приведения h_t к нормальному ускорению свободного падения равно

$$c_g = h_t \left(\frac{g}{g_H} - 1 \right).$$

Таким образом, действительное значение высоты столба рабочей жидкости h_{0H} , соответствующее нормальным условиям, определяется по формуле

$$h_{0H} = h_t + c_t + c_g.$$

Рассчитать действительное $p_i^{Uрасч}$, Па, давление и разрежение по формуле

$$p_i^{Uрасч} = g_M \cdot \rho_{жл} \cdot h_{0H},$$

где h_{0H} – разность уровней рабочей жидкости, м;

$\rho_{жл}$ – плотность рабочей жидкости в манометре при температуре окружающей среды t °С;

g_M – местное ускорение свободного падения, м/с².

Рассчитать погрешности U-образного водяного манометра Δ при прямом и обратном ходе и вариацию β показаний дифманометра:

$$\Delta_{пр} = p_i^{Uпр} - p_i^{Uрасч},$$

$$\Delta_{обр} = p_i^{Uобр} - p_i^{Uрасч},$$

$$\beta = \left| p_i^{Uпр} - p_i^{Uобр} \right|,$$

где $p_i^{пр}$ и $p_i^{обр}$ – показания поверяемого U-образного водяного манометра, соответствующие поверяемой отметке при изменении измеряемого давления в сторону увеличения и уменьшения, Па.

Оценить относительную погрешность δ поверяемого U-образного водяного манометра при прямом и обратном ходах измерений по формулам

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{\Delta_{\text{пр}}}{p_i^{\text{пр}}} \cdot 100 \%,$$

$$\delta_{\text{обр}} = \frac{\Delta_{\text{обр}}}{p_i^{\text{обр}}} \cdot 100 \%.$$

Таблица 6.1

Таблица измерений и результатов

№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	Показания по шкале МНН-240, м			Показания по шкале U-образного манометра, м		Давление по U-образному манометру, Па	
		$l_0, \text{м}$	$l_{\text{пр}}$	$l_{\text{обр}}$	$h_{\text{пр}}$	$h_{\text{обр}}$	$p_{\text{пр}}$	$p_{\text{обр}}$

Таблица 6.2

Таблица результатов

№ п/п	Расчетное давление, Па				$h_{0\text{н}},$ м	$\Delta_{\text{пр}}$	$\Delta_{\text{обр}}$	β	$\delta_{\text{пр}}$	$\delta_{\text{обр}}$
	по МНН-240		по U-образному манометру							
	$p_i^{\text{пр}}$	$p_i^{\text{обр}}$	$p_i^{\text{Uпр}}$	$p_i^{\text{Uобр}}$						

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВА ДЕФОРМАЦИОННЫХ МАНОМЕТРОВ И ДИФМАНОМЕТРОВ

Цель работы: изучение принципа действия, конструкции деформационных манометров и их поверки.

Основные положения

В деформационных манометрах используется зависимость деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления.

Пропорциональная давлению деформация преобразуется в показания или соответствующие изменения выходного сигнала. Большинство деформационных манометров и дифманометров содержат упругие чувствительные элементы, осуществляющие преобразование давления в пропорциональное перемещение рабочей точки.

Наиболее распространенные упругие чувствительные элементы (рис. 7.1 и 7.2) – трубчатые пружины, сильфоны и мембраны (плоские и гофрированные мембраны, мембранные коробки и вялые мембраны с жестким центром).

Статической (упругой) характеристике чувствительного элемента, связывающей перемещение рабочей точки с давлением, присуще наличие начальной зоны пропорциональных перемещений рабочей точки, в которой имеют место упругие деформации, и нелинейной области, в которой возникают пластические деформации.

Несовершенство упругих свойств материалов чувствительных элементов обуславливает наличие гистерезиса статической характеристики и упругое последствие. Последнее проявляется в запаздывании перемещения рабочей точки по отношению к приложенному давлению и медленном возвращении ее в начальное положение после снятия давления.

Форма и крутизна статической характеристики зависят от конструкции чувствительного элемента, материала, температуры. Рабочий диапазон выбирается в области упругих деформаций с обеспечением запаса на случай перегрузки чувствительного элемента давлением.

Упругие свойства чувствительных элементов характеризуются коэффициентом жесткости по силе:

$$k_F = \frac{F}{h} = \frac{pS_3}{h},$$

где F – сила, действующая на упругий чувствительный элемент (перестановочное усилие);

S – эффективная площадь элемента;

h – перемещение рабочей точки.

Полюе одновитковые трубчатые пружины (рис. 7.1, *а*) имеют эллиптическое или плоскоовальное сечение. Один конец пружины 1 , в который поступает измеряемое давление, закреплен неподвижно в держателе 2 , второй (закрытый) может перемещаться. Под действием разности измеряемого внутреннего давления и внешнего атмосферного трубчатая пружина деформируется. Малая ось сечения трубки увеличивается, большая уменьшается, при этом пружина раскручивается и ее свободный конец совершает перемещение в 1–3 мм. Для давлений до 5 МПа трубчатые пружины изготавливают из латуни, бронзы, а для более высоких давлений – из легированных сталей и сплавов никеля. Третий вид трубок (рис. 7.1, *в*) выполняют из легированной стали и используют для измерения высоких давлений (свыше 98 МПа).

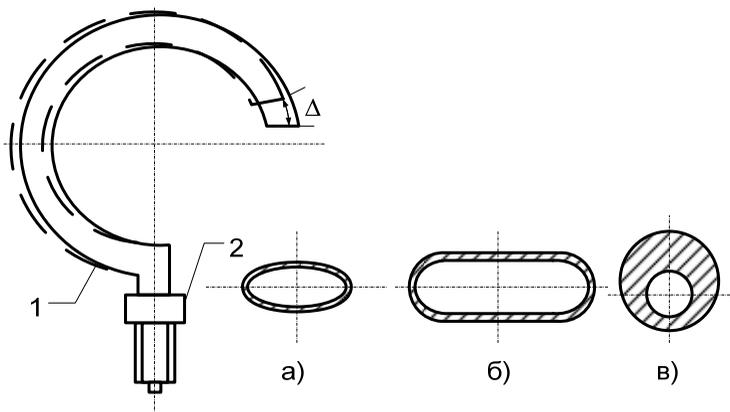


Рис. 7.1. Трубчатая пружина Бурдона:

а – эллиптического сечения; *б* – плоскоовального сечения;

в – круглого сечения; 1 – трубка; 2 – держатель

Сильфонные и мембранные чувствительные элементы имеют более широкие возможности для увеличения эффективной площади с целью получения требуемого перестановочного усилия, что позволяет использовать их для измерения малых избыточных давлений и разрежения. *Сильфон* (рис. 7.2, а) представляет собой тонкостенную трубку с поперечными кольцевыми гофрами на боковой стенке. Жесткость сильфона зависит от материала, наружного и внутреннего диаметров, толщины стенки заготовки, радиуса закругления гофр r и угла их уплотнения α , числа гофр. Сильфоны бывают **цельнотянутыми** и **сварными**. Широко применяются в манометрах и дифманометрах.

Мембранные чувствительные элементы наиболее разнообразны по конструкции. На рис. 7.2, б, плоская или пластинчатая мембрана представляет собой гибкую тонкую пластину, закрепленную по окружности. Под действием разности давлений, действующих с обеих сторон на мембрану, ее центр перемещается.

Плоские мембраны имеют нелинейную упругую характеристику и малые перемещения рабочей точки, поэтому их в основном применяют для преобразования давления в силу (пьезоэлектрические преобразователи) или поверхностные деформации (тензопреобразователи).

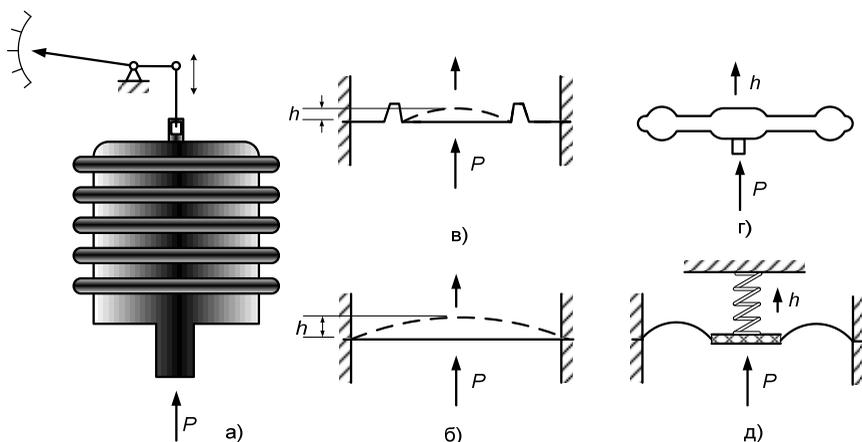


Рис. 7.2. Сильфонные и мембранные чувствительные элементы:
 а – сильфон; б – плоская мембрана; в – гофрированная мембрана;
 г – мембранная коробка; д – вьюлые мембраны

Гофрированные мембраны и мембранные коробки (рис. 7.2, в, г) используются для получения улучшенной статической характеристики. Профили мембран могут быть пильчатыми, трапецеидальными, синусоидальными. Гофрирование мембраны приводит к увеличению ее жесткости, спрямлению статической характеристики и увеличению зоны пропорциональных перемещений, рабочей точки. Более широко используются мембранные коробки, которые представляют собой сваренные или спаянные по внешней кромке мембраны. Жесткость коробки вдвое ниже жесткости каждой из мембран. В дифманометрах, чувствительных элементах регуляторов прямого действия используются мембранные блоки, включающие две коробки и более. **Вялые мембраны** применяются в напоромерах и тягомерах (см. рис. 7.2, д), их изготовляют из бензонастойкой прорезиненной ткани. В центре мембраны крепятся металлические пластины, в одну из которых упирается винтовая пружина, выполняющая функции упругого элемента.

Трубочато-пружинные манометры. Схема показывающего трубочато-пружинного манометра представлена на рис. 7.3.

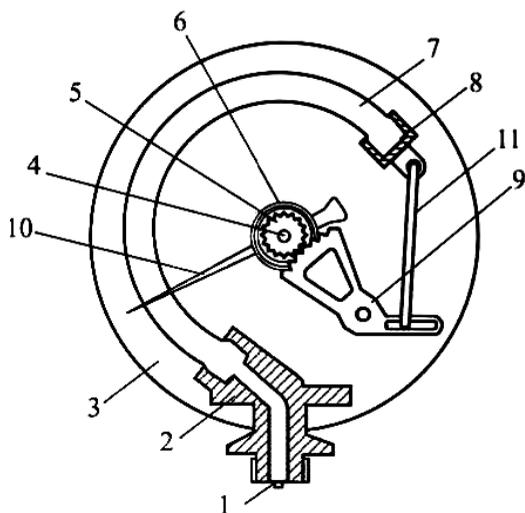


Рис. 7.3 Манометр с трубочатой пружиной:
 1 – ниппель; 2 – держатель; 3 – корпус; 4 – ось; 5 – шестерня;
 6 – пружина; 7 – трубочатая пружина; 8 – запаянный конец;
 9 – зубчатый сектор; 10 – стрелка; 11 – тяга

Большинство показывающих, самопишущих, сигнализирующих манометров и преобразователей давления с трубчатой пружиной являются устройствами прямого преобразования, в которых давление последовательно преобразуется в перемещение чувствительного элемента и связанного с ним механически показывающего, регистрирующего, контактного устройства, элемента пневматического или электрического преобразователя.

Трубчато-пружинные показывающие манометры выпускаются с верхним пределом измерения от 0,1 МПа (1 кгс/см²) до 103 МПа (104 кгс/см²). Пружинные вакуумметры имеют диапазон измерения 0,1–0 МПа. Мановакуумметры при нижнем пределе измерения 0,1 МПа имеют верхний предел измерения по избыточному давлению от 0,1 до 2,4 МПа. Образцовые показывающие пружинные манометры имеют класс точности 0,15; 0,25 и 0,4; рабочие 1,5; 2,5; 4; рабочие повышенной точности – 0,6 и 1. Промышленностью выпускаются механические показывающие и самопишущие манометры с одновитковой (типа МТ) и многовитковой (типа МТМ) трубчатой пружиной.

Показывающие и самопишущие манометры могут содержать дополнительные устройства, осуществляющие замыкание электрической цепи при определенном значении измеряемого давления (тип ЭКМ), преобразование перемещения конца трубчатой пружины в пропорциональный электрический (тип МЭД, МПЭ, МП-Э) или пневматический сигнал.

Порядок выполнения работы

Для выполнения лабораторной работы ознакомиться с общими сведениями по измерению давления, деформационным и грузопоршневым манометрам, после чего выполнить следующие действия по запуску комплекса компьютерных лабораторных работ по дисциплине «Измерение неэлектрических величин».

Для выполнения данной лабораторной работы используется комплекс компьютерных лабораторных работ по дисциплине «Измерение неэлектрических величин». Для входа в программу необходимо щелкнуть на кнопке «Пуск», выбрать пункт «Программы» ⇒ «DECTsogu» ⇒ «Измерение неэлектрических величин», далее появится заставка (рис. 7.4). Управление клавишами в процессе работы производится мышью. Нажатие клавиши «Далее...» приве-

В работе имеется стандартный набор клавиш. Верхний ряд клавиш: «Введение» – переход к разделу введение; «Теория» – переход к разделу теория; «Установка» – переход к разделу установка; «Порядок» – переход к разделу порядок проведения работы; «Контр. вопросы» – переход к разделу контрольные вопросы; «Отчет» – переход к разделу содержание отчета; «Литература» – переход к разделу рекомендуемая литература; «Авторы» – переход к разделу об авторах.

В окне каждой лабораторной работы отображена экспериментальная установка и расположенная в правой части экрана панель управления, на которой находятся клавиши, предназначенные для управления и регулирования работы основных компонентов, а также цифровые индикаторы, дублирующие механические приборы. Последовательность команд для выполнения лабораторной работы:

1. Открыть полностью вентили 1, 2 (ручки переключателей «Вентиль 1» и «Вентиль 2»).

2. При прямом ходе установить с помощью маховика поверяемое значение давления (ручка переключателя и «Маховик»).

3. Зафиксировать поверяемое и действительное значение в таблицу (клавиша «Зафиксировать»).

4. При обратном ходе действия производятся в том же порядке, при тех же значениях давления, как и при прямом ходе.

5. Занести результаты измерений из электронной таблицы в протокол отчета табл. 7.1 и использовать их в дальнейших расчетах.

6. Рассчитать погрешности поверяемого манометра Δ при прямом и обратном ходе и вариацию β показаний:

$$\Delta_{\text{пр}} = p_i^{\text{пр}} - p_i^{\text{расч}},$$

$$\Delta_{\text{обр}} = p_i^{\text{обр}} - p_i^{\text{расч}},$$

$$\beta = \left| p_i^{\text{пр}} - p_i^{\text{обр}} \right|,$$

где $p_i^{\text{пр}}$ и $p_i^{\text{обр}}$ – показания поверяемого манометра, соответствующие поверяемой отметке при изменении измеряемого давления в сторону увеличения и уменьшения, кг/см².

Оценить относительную погрешность δ поверяемого манометра при прямом и обратном ходе измерений по формулам

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{\Delta_{\text{пр}}}{p_i^{\text{пр}}} \cdot 100 \%,$$

$$\delta_{\text{обр}} = \frac{\Delta_{\text{обр}}}{p_i^{\text{обр}}} \cdot 100 \%.$$

Занести результаты расчетов в табл. 7.2. Произвести анализ полученных данных и сделать вывод о степени годности прибора к эксплуатации.

Таблица 7.1

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Поверяемое значение давления $P_{\text{н}}$, кг/см ²		Действительное значение давления $P_{\text{д}}$, кг/см ²	
	прямой ход $p_i^{\text{пр}}$	обратный ход $p_i^{\text{обр}}$	прямой ход $p_i^{\text{пр}}$	обратный ход $p_i^{\text{обр}}$

Таблица 7.2

Таблица результатов

№ п/п	Погрешность манометра				β
	прямой ход, $\Delta_i^{\text{пр}}$	обратный ход, $\Delta_i^{\text{обр}}$	прямой ход, $\delta_i^{\text{пр}}$	обратный ход, $\delta_i^{\text{обр}}$	

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Основные положения

В основе работы *тензопреобразователей (тензорезисторов)* лежит явление *тензоэффекта*, заключающееся в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при их механической деформации.

По способу закрепления на чувствительных элементах датчиков они делятся на *наклеиваемые* и *ненаклеиваемые*, по конструктивному выполнению на:

- *проволочные*;
- *фольговые*;
- *полупроводниковые*.

Проволочные тензопреобразователи (рис. 8.1) конструктивно представляют собой отрезок тонкой проволоки l (диаметром 0,02–0,05 мм), которая зигзагообразно наклеена на тонкую бумажную или пленочную основу (подложку) 2. Сверху проволока также закрыта тонкой бумагой или лаковой пленкой 3, или фетром. Для включения в измерительную схему к концам проволоки припаиваются медные выводы 4. Измерительной базой преобразователя является длина петель решетки A , величина которой лежит в пределах 1,5–100 мм. Ширина решетки B равна 5–10 мм. Номинальное сопротивление 10–1000 Ом, номинальный ток 30 мА.

Фольговые тензопреобразователи (рис. 8.2) представляют собой развитие проволочных. Вместо решеток из проволоки применяют решетку из фольги толщиной 0,004–0,012 мм. Рисунок решетки выбирают так, чтобы можно было снизить деформации, которые в фольговых тензопреобразователях практически сводятся к нулю. На рис. 8.2, *а*, представлена типовая форма фольгового тензопреобразователя, на рис. 8.2, *б*, – короткобазовый преобразователь, на рис. 8.2, *в*, – для наклейки на круглую мембрану.

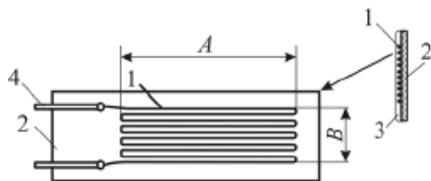


Рис. 8.1. Проволочный тензопреобразователь:
 1 – проволока; 2 – подложка;
 3 – защитная пленка;
 4 – медные выводы

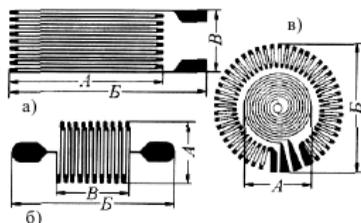


Рис. 8.2. Фольговые тензопреобразователи:
 а – типовой; б – короткобазовый;
 в – круговой

Фольговые тензопреобразователи пропускают больший ток, чем проволочные, благодаря большей площади поперечного сечения проводника при тех же размерах решетки и большей теплоотдаче, улучшающей теплообмен вследствие большей площади прилегания к деформируемой детали (чувствительному элементу датчика). Благодаря этому можно увеличить значение номинального тока до 0,2 А. Сопротивление фольговых тензопреобразователей равно 30–250 Ом.

В качестве материала решеток проволочных и фольговых тензопреобразователей применяются как чистые металлы (серебро, платина, медь), так и сплавы (константан, нихром, манганин и др.).

Достоинства: практически полное отсутствие их влияния на деформацию детали; линейность характеристики; низкая стоимость.

Недостатки: относительно низкий температурный диапазон работоспособности от -40 до $+70$ °С.

Полупроводниковые тензопреобразователи отличаются от проволочных и фольговых большим (до 50 %) изменением сопротивления при деформации и более высоким пределом чувствительности к температуре (в 10–20 раз). Преимущество заключается в более высоком (в 60 раз) коэффициенте тензочувствительности, малых размерах (длина базы $A = 3-10$ мм), больших значениях выходного сигнала.

Наиболее сильно тензоэффект выражен в таких полупроводниковых материалах, как германий, кремний, антимонид индия, фосфид индия, арсенид галлия, антимонид галлия. Для тензопреобразователей чаще применяют германий и кремний в виде пластин толщиной 0,03–0,2 мм, шириной 0,5–1 мм и длиной (базой) 3–15 мм.

Способы изготовления полупроводниковых тензопреобразователей:

- вырезание из полупроводникового монокристалла;
- выращивание монокристалла посредством конденсации паров;
- нанесение на некоторые виды подложек тонких пленок со свойствами монокристаллов;
- получение диффузионным способом.

Широкое применение в изготовлении общепромышленных тензорезисторных ИПД в силу своих высоких механических, изолирующих и теплоустойчивых качеств получила технология КНС – «кремний на сапфире». Упрощенная конструкция чувствительного элемента тензопреобразователя, основанного на данной технологии, представлена на рис. 8.3. Чувствительный элемент состоит из сапфировой подложки 3, на которую диффузионным способом нанесены тензорезисторы 4 (чаще всего в виде уравновешенного измерительного моста Уитстона). Подложка припаяна твердым припоем 2 к титановой мембране 1.

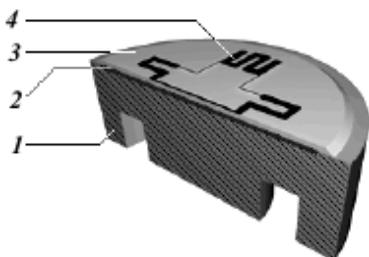


Рис. 8.3. Чувствительный элемент полупроводникового тензопреобразователя:
1 – титановая мембрана;
2 – серебряносодержащий припой;
3 – сапфировая подложка;
4 – тензорезисторы

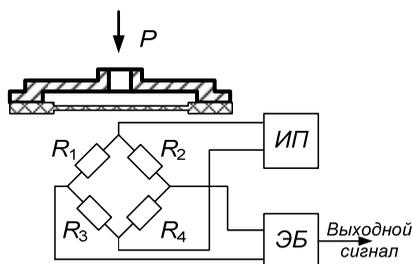


Рис. 8.4. Структурная схема тензорезисторного преобразователя давления

Чувствительный элемент включается в общую измерительную цепь преобразователя давления, структурная схема которого представлена на рис. 8.4. Деформация измерительной мембраны под воздействием внешнего давления P приводит к локальным деформациям тензорезисторного моста, состоящего из постоянных тензо-

резисторов R_2 , R_3 , R_4 , переменного R_1 , запитанного от источника питания ИП. В результате происходящей разбалансировки моста, сигнал преобразуется электронным блоком ЭБ в унифицированный выходной электрический сигнал.

Достоинства: высокий температурный диапазон работоспособности чувствительных элементов (от -160 до $+1500$ °С), хорошая защищенность чувствительного элемента от воздействия любой агрессивной среды, налаженное серийное производство, низкая стоимость.

Недостатки: малая гибкость, небольшая механическая прочность, нелинейность характеристики, большой разброс характеристик однотипных преобразователей, нестабильность параметров.

Конструкция одной из полупроводниковых ИПД типа «Сапфир-22» представлена на рис. 8.5.

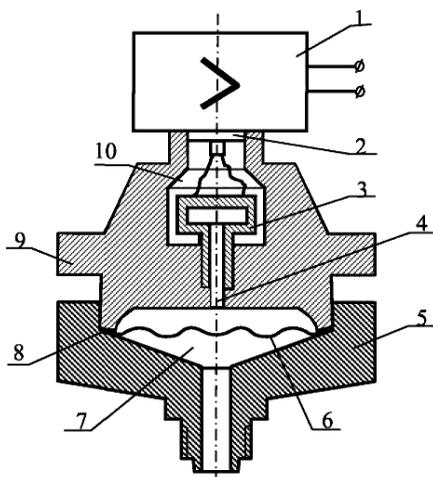


Рис. 8.5. Конструкция ИПД «Сапфир-22»:

- 1 – электронный блок; 2 – гермовывод; 3 – тензопреобразователь;
4 – канал; 5 – фланец; 6 – измерительная мембрана; 7 – измерительная камера;
8 – прокладка; 9 – основание; 10 – внутренняя полость

Мембранный тензопреобразователь 3 размещен внутри основания 9. Внутренний канал 4 тензопреобразователя заполнен кремнийорганической жидкостью и от отделен от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, приваренной по наружному контуру к основанию 9.

Измеряемое давление подается в камеру 7 фланца 5, который уплотнен прокладкой 8. Измеряемое давление воздействует на мембрану 6 и через жидкость воздействует на мембрану тензопреобразователя, вызывая ее прогиб и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в электронный блок 1 по проводам через гермовывод 2.

Преобразователи «Сапфир-22» имеют на выходе токовый сигнал 0–5 мА (0–20, 4–20 мА) при сопротивлении нагрузки до 2,5 кОм (1 кОм), предельная погрешность приборов 0,25; 0,5 %, напряжение питания преобразователей 36 В. Приборы выпускают в нескольких модификациях, предназначенных для:

- измерения избыточного давления (ДИ);
- вакуума (ДВ);
- избыточного давления и вакуума (ДИВ);
- абсолютного давления (ДА);
- разности давлений (ДД);
- гидростатического давления (ДГ).

К достоинствам преобразователей «Сапфир-22» относим:

- использование небольших деформаций чувствительных элементов;
- надежность и стабильность характеристик;
- виброустойчивость.

Предельная погрешность ИПД не превышает 1 %.

Порядок выполнения работы

Для выполнения лабораторной работы ознакомиться с общими сведениями по измерению давления, электрическим датчикам давления, после чего выполнить следующие действия по запуску комплекса компьютерных лабораторных работ по дисциплине «Измерение неэлектрических величин». Для входа в программу необходимо щелкнуть на кнопке «*Пуск*», выбрать пункт «*Программы*» ⇒ «*DECSogu*» ⇒ «*Измерение неэлектрических величин*», далее появится заставка (рис. 8.6).

Управление клавишами в процессе работы производится мышью. Нажатие клавиши «*Далее...*» приведет к запуску всего комплекса

работ (рис. 8.7). Нажатие клавиши «Лабораторная работа № 4» приведет к запуску титульной страницы выбранной работы.



Рис 8.6. Заставка Центра дистанционного образования

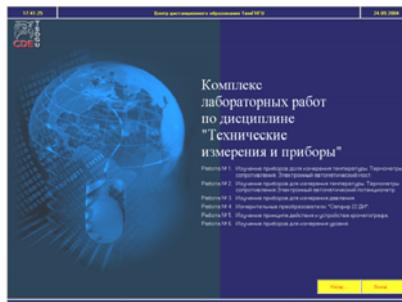


Рис 8.7. Окно списка лабораторных работ

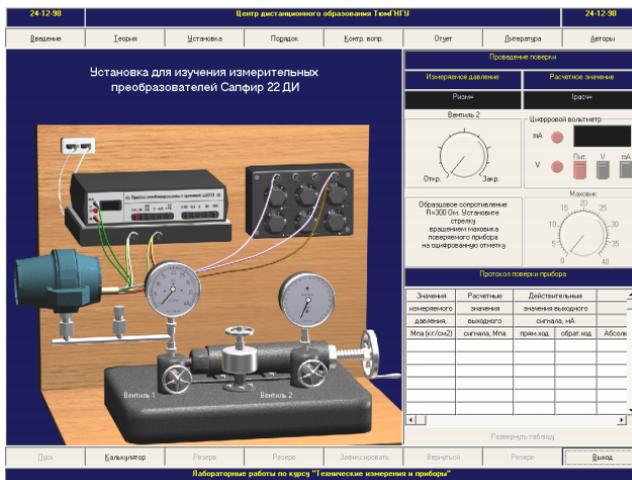


Рис. 8.8. Основное рабочее окно выполнения лабораторной работы

В каждой работе имеется стандартный набор клавиш. Верхний ряд клавиш: «Введение» – переход к разделу введение. «Теория» – переход к разделу теория. «Установка» – переход к разделу установка. «Порядок» – переход к разделу порядок проведения работы. «Контр. вопросы» – переход к разделу контрольные вопросы. «Отчет» – переход к разделу содержание отчета. «Литература» – переход к разделу рекомендуемая литература. «Авторы» – переход

к разделу об авторах. Нижний ряд клавиш: «*Пуск*» – запуск алгоритма лабораторной работы; «*Калькулятор*» – запуск калькулятора; «*Резерв*» – резервные, не используемые в работе клавиши; «*Выход*» – завершение работы (выход из комплекса).

В окне каждой лабораторной работы отображена экспериментальная установка и расположенная в правой части экрана панель управления, на которой находятся клавиши, предназначенные для управления и регулирования работы основных компонентов, а также цифровые индикаторы, дублирующие механические приборы. Последовательность действий для выполнения лабораторной работы:

1. Открыть полностью Вентили 1, 2 (ручка переключателя «*Вентили 1 и 2*»). Включить питание цифрового вольтметра (клавиша «*Пит.*»).

2. При прямом ходе установить с помощью маховика поверяемое значение давления (ручка переключателя «*Маховик*»).

3. Зафиксировать поверяемое и действительное значение в таблицу (клавиша «*Зафиксировать*»).

4. При обратном ходе действия производятся в том же порядке, при тех же значениях давления, как и при прямом ходе.

5. Занести результаты измерений из электронной таблицы в протокол отчета табл. 8.1 и использовать их в дальнейших расчетах.

6. Определить расчетное значение выходного напряжения $I_i^{\text{расч}}$, мА, поверяемого дифманометра для каждой поверяемой отметки:

$$I_i^{\text{расч}} = \frac{I_{\text{ср}}^{\text{max}}}{\Delta p_{\text{н}}} p_i,$$

где $I_{\text{ср}}^{\text{max}}$ – среднее значение выходного напряжения, соответствующее верхнему пределу измерения $\Delta p_{\text{н}}$, мА.:

$$I_{\text{ср}}^{\text{max}} = \frac{I_{\text{пр}}^{\text{max}} + I_{\text{обр}}^{\text{max}}}{2},$$

где $I_{\text{пр}}^{\text{max}}$ и $I_{\text{обр}}^{\text{max}}$ – значения выходного напряжения, соответствующие верхнему пределу измерения $\Delta p_{\text{н}}$ при увеличении и уменьшении давления, мА.

Рассчитать погрешности дифманометра Δ при прямом и обратном ходе и вариацию β показаний дифманометра:

$$\Delta_{\text{пр}} = I_i^{\text{пр}} - I_i^{\text{расч}},$$

$$\Delta_{\text{обр}} = I_i^{\text{обр}} - I_i^{\text{расч}},$$

$$\beta = \left| I_i^{\text{пр}} - I_i^{\text{обр}} \right|,$$

где $I_i^{\text{пр}}$ и $I_i^{\text{обр}}$ – выходное напряжение поверяемого дифманометра, соответствующее поверяемой отметке при изменении измеряемого давления в сторону увеличения и уменьшения, мА.

Занести результаты расчетов в табл. 8.2. Построить график зависимости расчетного и действительного значения выходного тока от измеряемого давления.

Таблица 8.1

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Значение измеряемого давления $P_{\text{из}}$, МПа (кг/см ²)	Расчетное значение выходного сигнала P , МПа	Действительное значение выходного сигнала, мА	
			прямой ход	обратный ход

Таблица 8.2

Таблица результатов

№ п/п	Погрешность манометра				β
	прямой ход, $\Delta_i^{\text{пр}}$	обратный ход, $\Delta_i^{\text{обр}}$	прямой ход, $\delta_i^{\text{пр}}$	обратный ход, $\delta_i^{\text{обр}}$	

Лабораторная работа № 9

МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Цель работы: изучение основных методов и средств измерений параметров газового потока и освоение применения данных методов на практике.

Общие сведения

Измерение скоростей и давлений в потоках жидкостей и газов имеет особое значение, поскольку позволяет получить практически всю информацию о свойствах этих потоков. Существует много методов измерения, основанных на различных физических процессах, по применяемым физическим принципам при проведении измерений их можно разделить на пять групп:

1. Методы, основанные на использовании энергии потока.
2. Тепловые методы.
3. Методы, основанные на введении в поток невесомой метки и измерении ее скорости.
4. Корреляционные методы.
5. Оптические методы.

В системах вентиляции и кондиционирования зданий и сооружений в настоящее время для измерения давления и скорости потока используются следующие методы, относящиеся к использованию энергии потока:

- пневматический метод измерения скорости;
- метод измерения крутящего момента (анемометры);
- тепловые методы (термоанемометры).

В основе теплового метода определения скорости потока лежит измерение изменения температуры или электрического сопротивления нагретого тела, находящегося в потоке газа.

Проведение измерений давления и скорости потока осуществляется по ГОСТ 12.3.018–79 «Методы аэродинамических испытаний» и ГОСТ 17.2.4.07–90 «Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения». По ним выбор точек измерения в воздуховодах систем вентиляции и кондиционирования определяется следующими принципами.

Для измерения давлений и скоростей движения воздушного потока в воздуховодах должны быть выбраны участки с расположением мерных сечений на расстоянии не менее шести гидравлических диаметров D_h , м:

$$D_h = \frac{4F}{A},$$

где F – площадь воздуховода, м^2 ;

A – периметр сечения, м, за местом возмущения потока в воздуховоде (отводы, шиберы, диафрагмы и т. п.) и не менее двух гидравлических диаметров перед ними.

При отсутствии прямолинейных участков необходимой длины допускается располагать мерное сечение в месте, делящем выбранный для измерения участок в соотношении 3:1 в направлении движения воздуха. Допускается размещать мерное сечение непосредственно в месте расширения или сужения потока. При этом размер мерного сечения принимают соответствующим наименьшему сечению канала. По этой методике проводятся измерения скоростей в нескольких местах, равномерно распределенных по сечению воздуховода, после чего вычисляют среднюю скорость по сечению. Если воздуховод имеет круглое сечение, его разделяют концентрическими окружностями на несколько равновеликих кольцевых поверхностей (рис. 9.1), измеряя скорость воздуха в различных точках окружностей, представляющих собой внутренние границы таких колец.

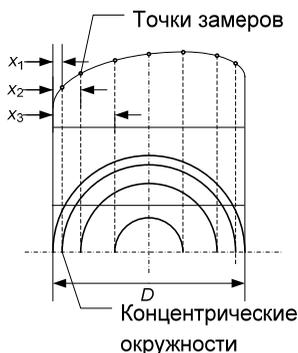


Рис. 9.1. Точки измерения на круглом воздуховоде

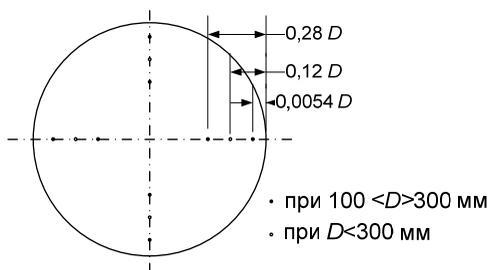


Рис. 9.2. Точки измерения при логарифмически линейном методе

В этом случае средняя скорость в данном сечении равна средней арифметической результатов измерений скорости. Пример: если поверхность разделена на пять равновеликих частей, относительное расстояние x_n/D для точек замеров от стенки воздуховода составит значение по методу равновеликих концентрических колец.

x_1/D	x_2/D	x_3/D	x_4/D	x_5/D
0,026	0,082	0,146	0,226	0,342

Другой метод называется логарифмическим линейным, ГОСТ 12.3.018.–79 «Методы аэродинамических испытаний». Если измерения производятся в круглом воздуховоде в точках, расположенных, по меньшей мере, на двух взаимно перпендикулярных лучах, замеры следует осуществлять как минимум в двух–шести точках каждого из секторов окружности (рис. 9.1, а). Количество точек измерений определяется формой и размерами мерного сечения. В случае измерений в прямоугольных воздуховодах их сечение разделяют на некоторое число равных прямоугольников и замер скорости воздуха производят в центре тяжести каждого прямоугольника (рис. 9.2, б).

Однако в этом случае речь идет о грубом достаточном методе. Поскольку вблизи стенок скорость движения воздуха заметно отличается от скорости движения воздуха в центре воздуховода, нужно, по-видимому, в этой области разбивать площадь сечения на более мелкие элементарные участки, а при вычислении средней скорости движения воздуха в воздуховоде учитывать соответствующие значения доли этих участков в общей площади поперечного сечения. Количество измерений в каждой точке должно быть не менее трех.

Метод кругового сканирования. В воздуховодах большого сечения или на выходе из фильтров, теплообменников и других устройств можно рассчитать среднюю скорость движения воздуха, медленно перемещая крыльчатый анемометр с постоянной очень небольшой скоростью вдоль нескольких воображаемых окружностей по всей площади сечения воздуховода. Такие измерения необходимо выполнять по несколько раз для определения более полной эпюры распределения скорости по всему сечению воздуховода. Если скорость движения прибора меняется очень быстро, расчетная величина часто оказывается сильно завышенной. То же самое имеет место в случае, когда площадь проходного сечения крыльчатки анемометра больше чем на 1 % превышает площадь измеряемого сечения.

Метод входной насадки. Для приточных и вытяжных вентиляторов со свободным подсосом воздуха расход воздуха измеряют с помощью входной насадки с полностью закругленными краями на входе в него, который устанавливается перед вентилятором или другим измеряемым сечением. Скорость определяют различными контрольно-измерительными приборами. Удовлетворительные результаты измерений достигаются, если потери давления в отверстиях значительно больше, чем потери в насадке. В случае необходимости результаты следует скорректировать.

Пневматический метод измерения скорости. Основан на использовании уравнения Бернулли, в соответствии с которым полное давление одинаково для всех сечений потока. Давление измеряется скоростной трубкой, называемой трубкой Пито–Прандтля (рис. 9.3). Конструктивно она представляет собой изогнутую под прямым углом трубку с двумя отверстиями. Одно отверстие выполнено в торцевой части трубки (критической точке), другое (статическое отверстие) – на боковой стенке трубки. При измерении трубка помещается в исследуемый поток торцевым отверстием навстречу движущейся жидкости либо газу.

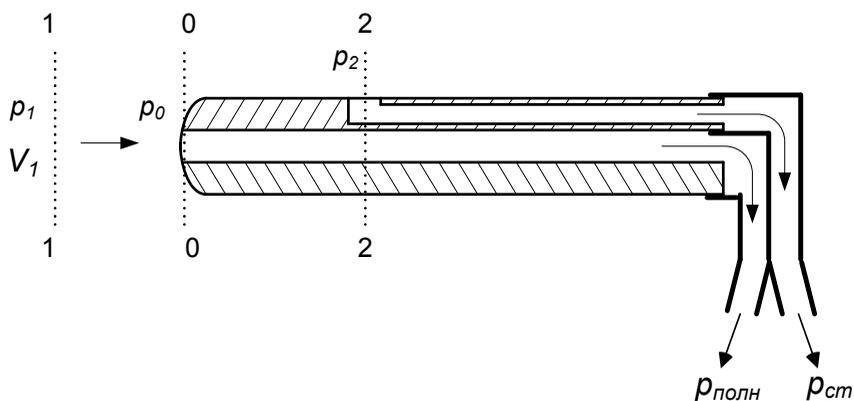


Рис. 9.3. Трубка Пито–Прандтля

Поскольку скорость V_0 в торцевой части трубки равна нулю, то эта часть трубки является критической точкой для потока. Уравнение Бернулли для двух сечений 1–1 и 0–0 газового потока имеет вид

$$p_{\text{полн.}} = \frac{\rho_{\Gamma} V_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho_{\Gamma} V_0^2}{2} + p_0 = p_0,$$

где $p_{\text{полн}}$ – полное давление;

p_1 и p_0 – статические давления в двух сечениях, Па;

V_1 – скорость потока, м/с;

ρ_{Γ} – плотность газа кг/м³.

Тогда скорость в потоке равна

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_1)}{\rho_{\Gamma}}} = \sqrt{\frac{2p_{\text{дин.}}}{\rho_{\Gamma}}}.$$

Динамическое давление в точке измерения $P_{\text{дин.}}$, Па, вычисляется по формуле

$$P_{\text{дин.}} = \frac{v^2}{2} \rho_{\Gamma}, \quad (9.1)$$

где v – скорость воздуха, м/с;

ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³.

Для измерения скорости потока необходимо знать динамическое давление либо разность между полным и статическим давлениями. Полное давление $p_{\text{полн}} = p_0$ можно определить, если отверстие в критической точке трубки Пито–Прандтля соединить с микроманометром. Статическое давление $p_{\text{ст}} = p_1$ определяется с помощью отверстия в боковой стенке трубки в сечении 2–2 (рис. 9.1). При пренебрежении подтормаживающим влиянием трубки можно считать, что скорость газа в этом сечении равна скорости V_1 . Из уравнения Бернулли, записанного для сечений 1–1 и 2–2, следует, что $p_1 = p_2$. Отверстие на боковой стенке трубки в сечении 2–2 часто называют статическим отверстием.

Если отверстие полного напора насадка соединить с одним коленом микроманометра, а отверстие статического давления – с другим, то микроманометр покажет непосредственно разность давлений

$$p_{\text{полн.}} - p_{\text{ст}} = \frac{\rho V_1^2}{2} = p_{\text{дин.}}$$

Иногда для измерения используются трубки только с одним торцевым отверстием, которые называются трубками Пито. Трубкой Пито измеряется полное давление. Статическое давление в данном случае определяется через отверстие на стенке канала, в котором движется газовый поток.

Анемометры. Чашечные анемометры (рис. 9.4) применяются главным образом для измерения средней скорости движения воздуха от 1 до 20 м/с. Приемной частью анемометра является четырехчашечная метеорологическая вертушка для измерения скорости ветра независимо от его направленности.

Для измерения скорости анемометр вносят в воздушный поток так, чтобы ось вертушки чашечного анемометра располагалась перпендикулярно воздушному потоку. Для малых значений скоростей в каждой точке необходимо провести измерение два раза, при несоответствии результатов в пределах +5 % выполняют дополнительные измерения.



Рис. 9.4. Чашечный анемометр MC-13



Рис. 9.5. Анемометр АСО-3 У5

При измерении скорости движения воздуха в проемах наружных ограждений зданий, в проемах между помещениями и тому подобном анемометры закрепляют на стойках или штангах, чтобы не заслонять площадь живого сечения проема, в котором производят измерение. В отверстиях площадью 1–2 м² средняя скорость движения определяется при медленном перемещении анемометра по всему сечению. При больших размерах сечение разбивается на несколько равновеликих площадей и измерение проводят в каждой из них.

Крыльчатые анемометры (рис. 9.5, 9.6) используются в основном в воздуховодах и каналах для измерения скорости направленного воздушного потока от 0,2 до 10 м/с.



Рис. 9.6. Анемометр АТЕ-1019



Рис. 9.7. Анемометр Testo 425

В стандартном исполнении они всегда соединены с указателем, который дает среднее значение скорости в течение определенного времени, как правило, за минуту, хотя современные анемометры производят измерения даже за более короткий срок до 10 секунд.

Отдельные модели оборудованы даже компьютерами, позволяющими рассчитывать среднюю скорость потока за определенный промежуток времени. В электронных анемометрах число оборотов мельничной вертушки, в отличие от механических, подсчитывают с помощью фотоэлектронного датчика, определяющего число падающих световых импульсов во время вращения вертушки.

Термоанемометры используют эффект подогреваемой термопары (рис. 9.7), они предназначены для измерения скорости воздушного потока и его температуры. Электродвижущая сила, возникающая в результате разности температур обдуваемой и необдуваемой термопар, пропорциональна скорости воздушного потока.

В ряде термоанемометров используются терморезисторы (термисторы) с отрицательным температурным коэффициентом, включаемые в качестве одного из плеч в измерительный мост Уитстона. Диапазон измерений подобных термоанемометров от 0,1 до 3 м/с с очень высокой точностью.

Экспериментальная установка

В рабочей области аэродинамической трубы 1 установлена трубка Пито–Прандтля 6, подключенная к микроманометру 5 для измерения скорости воздушного потока также используются лепестковый анемометр 7 и термоанемометр 8 (рис. 9.8). В аэродинамической трубе воздушный поток создается осевым вентилятором 2, подключенным к блоку управления 2 и блоку питания 3. Величина скорости потока в трубе регулируется изменением тока питания вентилятора, который контролируется блоком управления.

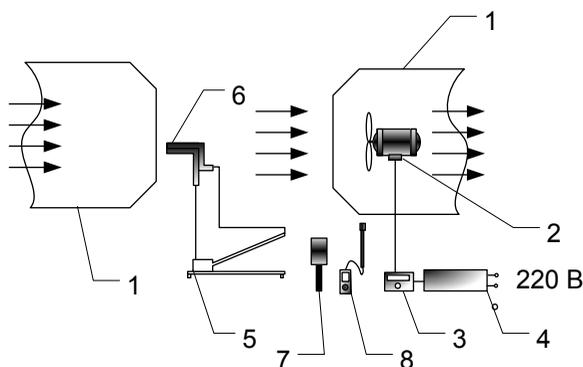


Рис. 9.8. Схема экспериментальной установки

Для выполнения лабораторной работы ознакомьтесь с общими сведениями по измерению давления жидкостными манометрами и скорости измерения потока воздуха, после чего выполнить следующие действия:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой. В отсутствие потока воздуха в аэродинамической трубе отметить начальное показание микроманометра l_0 .

2. Включить блок питания аэродинамической трубы. В соответствии с указанием преподавателя установить начальное значение тока питания вентилятора аэродинамической трубы. При установленном значении тока питания снять показание микроманометра l и анемометров. Данные записать в табл. 9.1, 9.2 и табл. 9.3.

3. Изменить величину тока питания I в соответствии с указанием. Произвести все измерения. Данные записать в таблицы.

Динамическое давление потока воздуха вычислить по формуле

$$p_{\text{дин}} = \rho_{\text{ж}} g K (l - l_0),$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность спирта в микроманометре ($\rho_{\text{ж}} = 809,5 \text{ кг/м}^3$);

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха ($\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$);

$l - l_0$ – разность показаний микроманометра, м;

$K = 0,2$ – масштаб микроманометра (указан на микроманометре),
по формуле (9.1.)

Вычислить скорость потока воздуха V по формуле

$$V = \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{в}}} K (l - l_0)}.$$

Полученные результаты внести в таблицы измерений и результатов.

Таблица 9.1

Таблица измерений и результатов

№ опыта	I, A	Показания микроманометра		$v, \text{ м/с}$	$p_{\text{дин}}, \text{ Па}$
		$l_0, \text{ мм}$	$l, \text{ мм}$		

Таблица 9.2

Таблица измерений и результатов

№ опыта	Тип анемометра	I, A	Показания анемометра, дел.		$v, \text{ м/с}$	$p_{\text{дин}}, \text{ Па}$
			$N_{\text{нач}}$	$N_{\text{кон}}$		

Таблица 9.3

Таблица измерений и результатов

№ опыта	Тип анемометра	I, A	$t_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{в}}, \text{ кг/м}^3$	$v, \text{ м/с}$	$p_{\text{дин}}, \text{ Па}$

Лабораторная работа № 10

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА И ГАЗОВ

Цель работы: изучение методов определения влажности воздуха, освоение методики использования i, d -диаграммы влажного воздуха и работа с гигрометром ВИТ-2.

Основные положения

Влажность газов, твердых тел и жидких сред является одним из важных показателей целого ряда технологических процессов в разных отраслях промышленности. Влажность воздуха и газов при технических измерениях может быть охарактеризована следующими параметрами:

1. **Абсолютной влажностью**, определяемой количеством водяного пара, содержащегося в единице объема газа, г/м^3 .
2. **Влажностью** – массой водяного пара, отнесенной к массе сухого газа, г/кг .
3. **Температурой точки росы** – температурой, при которой газ становится насыщенным содержащимся в нем водяным паром, $^{\circ}\text{C}$.
4. **Относительной влажностью**, определяемой отношением абсолютной влажности к максимально возможной влажности этого газа при данной температуре, %.

В настоящее время наибольшее распространение в технологических процессах получили следующие методы измерения влажности газов и воздуха:

- психрометрический;
- точки росы;
- гигрометрические.

Психрометрический метод измерения влажности основан на измерении психрометрической разности температур между «сухим» и «мокрым» термометрами. Мокрый термометр смачивается через специальный фитиль водой. Испарение, а соответственно и охлаждение, с поверхности резервуара мокрого термометра тем больше, чем ниже влажность газа. Поэтому разность температур сухого и мокрого термометров зависит от влажности газа.

Метод точки росы основан на определении температуры, при которой газ становится насыщенным находящейся в нем влагой. Эта температура определяется по началу конденсации водяного пара на зеркальной поверхности, температура которой должна устанавливаться любой в интервале температур работы влагомера.

Гигрометрические методы основаны на зависимости физических свойств гигроскопических материалов от влажности окружающей среды. К ним относится один из первых гигрометров, использующих удлинение обезжиренных человеческих волос от влажности воздуха. Электрические гигрометры используют зависимость сопротивления или диэлектрической проницаемости гигроскопического материала от влажности окружающего воздуха.

Влажный воздух. Атмосферный воздух можно рассматривать как *бинарную смесь* (смесь двух газов) сухого воздуха и водяного пара. Она и называется *влажным воздухом*. Сухая часть воздуха по объему состоит из 78,13 % азота, 20,90 % кислорода, 0,03 % углекислого газа и примерно 1 % инертных и других газов. С достаточной для технических расчетов точностью можно считать, что влажный воздух подчиняется всем законам смеси идеальных газов. Тогда по закону Дальтона общее давление атмосферного воздуха P_6 :

$$P_6 = P_в + P_п, \quad (10.1)$$

где P_6 – давление атмосферного воздуха, Па;

$P_в$ – давление сухого воздуха, Па;

$P_п$ – давление водяного пара, Па.

Воздух, состоящий из сухого воздуха и перегретого водяного пара, называется *ненасыщенным влажным воздухом*, а состоящий из сухого воздуха и насыщенного водяного пара – *насыщенным влажным воздухом*. Давление насыщенного пара p_n'' зависит только от температуры воздуха и может быть найдено по таблицам «Свойства влажного воздуха».

Охлаждение насыщенного воздуха сопровождается выпадением конденсата воды. При нагревании насыщенного воздуха водяной пар становится перегретым. Содержание водяного пара измеряется его количеством в граммах на 1 м^3 объема воздуха (*абсолютная влажность*).

Масса водяного пара, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха, называется *влажностью* (d). Содержание водяных паров в воздухе зависит от температуры, количества осадков, наличия водоемов, направляющих ветров.

Однако каждому значению температуры воздуха соответствует некоторое максимальное содержание пара в единице объема, при котором пар становится насыщенным.

Характеристикой влияния влажности воздуха на самочувствие людей является относительная влажность (φ).

Относительной влажностью воздуха φ называется отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к абсолютной влажности насыщенного воздуха при той же температуре:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{п}}''} \cdot 100 \%, \quad (10.2)$$

где φ – показатель относительной влажности воздуха;

$p_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара, Па;

$p_{\text{п}}''$ – парциальное давление водяного пара насыщенного воздуха, Па.

Относительную влажность воздуха выражают в процентах или в долях единицы.

Влагосодержание и относительная влажность воздуха связаны соотношением

$$d = \frac{\varphi \cdot p_{\text{п}}''}{P_{\text{а}} - p_{\text{п}}''}, \quad (10.3)$$

где φ – показатель относительной влажности воздуха;

d – влагосодержание воздуха, г/кг;

$P_{\text{а}}$ – давление атмосферного воздуха, Па;

$p_{\text{п}}''$ – парциальное давление водяного пара насыщенного воздуха, Па.

К основным параметрам воздуха относится не только температура, относительная влажность, влагосодержание, но и *энтальпия* i (теплосодержание). Энтальпию воздуха i выражают как сумму

$$i = i_{c.B} + d \cdot i_{п} = t + (1,89 \cdot t + 2500)d, \quad (10.4)$$

где $i_{c.B}$ – энтальпия 1 кг сухого воздуха, кДж/кг ;

$i_{п}$ – энтальпия водяных паров, кДж/кг

Основные параметры воздуха можно вычислять по формулам (10.1–10.4), однако для построения процессов изменения состояния воздуха удобнее пользоваться i, d -диаграммой влажного воздуха. На рис. 10.1 приведена i, d -диаграмма (диаграмма Рамзина).

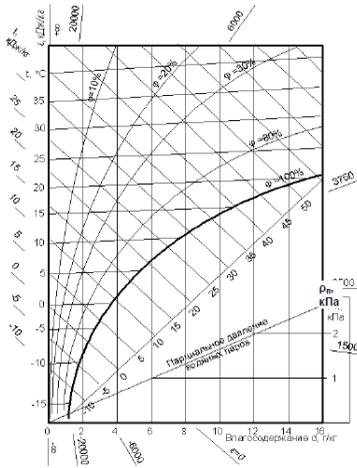


Рис. 10.1. i, d -диаграмма влажного воздуха

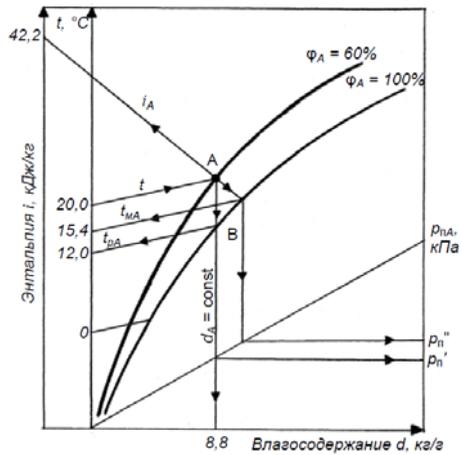


Рис. 10.2. Определение параметров воздуха с помощью i, d -диаграммы

По горизонтальной оси отложены значения влагосодержания и нанесена сетка вертикальных линий $d = \text{const}$. Под углом 135° к вертикальной оси диаграммы проведены линии постоянной энтальпии i . На диаграмму нанесены кривые равных значений относительной влажности ϕ от 0 до 100 % и линии постоянных температур в виде прямых под небольшим углом к горизонтальной оси диаграммы. i, d -диаграмма дополнена линией парциальных давлений водяного пара $p_{п}$.

Каждая точка диаграммы характеризуется взаимно согласованными параметрами $t, d, i, p_{п}, \phi$. Точки диаграммы определяют следующие состояния: ненасыщенного воздуха над кривой $\phi = 100\%$; насыщенного воздуха на кривой $\phi = 100\%$; насыщенного воздуха, содержащего капельки жидкой влаги или льда под кривой $\phi = 100\%$.

Диаграммой пользуются следующим образом (рис. 10.2). Пусть известно, что воздух имеет температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительную влажность 60% . На пересечении изотермы $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с линией $\varphi = 60\%$ получим точку A . Тогда по i, d -диаграмме легко прочесть остальные параметры воздуха: $i_A = 42,2\text{ кДж/кг}$; $d_A = 8,8\text{ г/кг}$; $p_{\text{плА}} = 1,4\text{ кПа}$.

По диаграмме можно определить температуру точки росы воздуха t_p . Если воздух охлаждать при $d = \text{const}$, то температура, при которой воздух становится насыщенным, будет t_p . Дальнейшее охлаждение сопровождается выпадением влаги. Для точки A температура точки росы $t_p = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точка B называется точкой росы для воздуха, имеющего состояние, характеризуемое точкой A .

Важнейшим параметром воздуха является температура по мокрому термометру t_m . Это температура, которую воздух принимает в результате его адиабатического насыщения (увлажнения). Если взять два термометра, смочить шарик одного термометра и поместить оба термометра в поток воздуха, то температура смоченного термометра будет ниже, чем температура сухого термометра. Объясняется это тем, что между воздухом и мокрым термометром происходит тепло- и массообмен. Оба термометра будут показывать одинаковую температуру, если омывающий их воздух будет насыщенным.

Таким образом, чтобы найти t_m для воздуха состояния точки A , надо из этой точки провести линию $i = \text{const}$ до пересечения с линией $\varphi = 100\%$. Значение t_m для точки A будет составлять $15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из диаграммы видно, что для воздуха заданных параметров температура по мокрому термометру t_m снижается при уменьшении относительной влажности φ воздуха.

Основное назначение диаграммы – это изображение процессов изменения состояния воздуха: увлажнения, нагревания, охлаждения и т. д. Изменение состояния воздуха может произойти тогда, когда ему подводится (отводится) тепло Q или влага W , или за счет одновременного воздействия обоих факторов. Процесс изменения состояния воздуха при этом характеризуется значением ε (кДж/кг), называемым тепловлажностным отношением, или угловым коэффициентом

$$\varepsilon = \frac{Q}{W}.$$

Если начальные параметры воздуха различны, а значения ε одинаковы, то линии, характеризующие изменение состояния воздуха, параллельны между собой.

Для построения процессов изменения состояния воздуха на i,d -диаграмме нанесены линии углового масштаба в виде пучка лучей, исходящих из центра координат диаграммы ($i = 0, t = 0, d = 0$) со значением ε от $-\infty$ до $+\infty$. Однако для того чтобы эти лучи не мешали основным линиям, оставляют только концы лучей на поле диаграммы.

Практическое пользование угловым масштабом сводится к следующему. Пусть известно начальное состояние воздуха в помещении, характеризуемое точкой A . Чтобы выяснить направление процесса с известным ε , нужно на полях i,d -диаграммы найти конец луча с этим значением, соединить его с центром координат и провести из точки A линию, параллельную этому лучу процесса.

Таким образом, параметрами состояния влажного воздуха являются t, p_n, φ, d, i при заданном общем давлении p_b . Основными параметрами, изменяющимися независимо друг от друга, являются t и φ , прочие параметры – производные. Определив значение t и φ , можно найти все остальные параметры воздуха как аналитическим путем, так и графическим с помощью i,d -диаграммы.

Порядок выполнения работы

Лабораторная установка (рис. 10.3) состоит из штатива 1 с держателем 2, в котором закреплен гигрометр ВИТ-2 3, и барометра 4 для измерения атмосферного давления. Гигрометр ВИТ-2 представляет собой вариант психрометра Августа. Относительную влажность в помещении следует измерять в центре помещения на высоте 1,1 м от пола.

При ручной регистрации показателей микроклимата следует выполнять не менее трех измерений с интервалом не менее 5 мин, при автоматической регистрации следует проводить измерения в течение 2 ч. Для расчетов в соответствии с нормативными показателями принимаем среднее значение измеренных величин.

Найти параметры состояния влажного воздуха p_n'' , φ, d, i при известном атмосферном давлении p_b и температурах t_b, t_m по формулам (10.2), (10.3) и (10.4). Данные измерений внести в табл. 10.1 и 10.2.

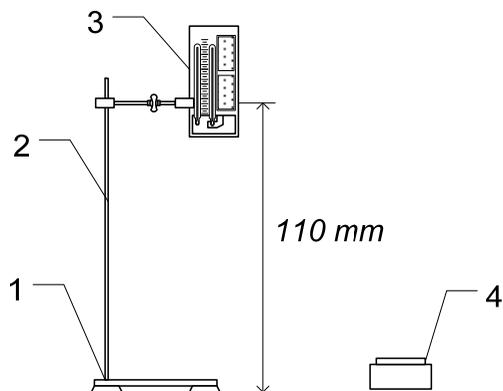


Рис. 10.3. Схема лабораторной установки

Таблица 10.1

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Температура воздуха, °С		Давление, Па		Относительная влажность воздуха φ по ВИТ-2, %
	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{м}}$	$P_{\text{б}}$	$p''_{\text{п}}$	

Таблица 10.1

Таблица измерений и результатов

№ п/п	Энтальпия i , кДж/кг		Влагосодержание d , г/кг		Относительная влажность возду- ха φ, %	
	по диа- грамме	расчет- ная	по диа- грамме	расчет- ная	по диа- грамме	расчет- ная

Лабораторная работа № 11

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Цель работы: изучение устройств и принципа действия тахометров, работающих по контактному методу. Овладение практическими навыками по проведению измерений угловой скорости контактными механическими тахометром.

Основные положения

Тахометрами называются приборы, предназначенные для измерения **угловой скорости** и **частоты вращения** валов машин и механизмов. За единицу угловой скорости ω принят *радиан в секунду* (рад/с). *Единицей частоты вращения* является секунда в минус первой степени (s^{-1}).

По принципу действия тахометры классифицируются следующим образом.

1. *Механические* тахометры – их измерительная часть состоит из механических преобразователей, к их числу относят:

- *центробежные тахометры;*
- *часовые тахометры;*
- *фрикционные тахометры;*
- *вибрационные тахометры;*
- *пневматические тахометры.*

2. *Магнитные* тахометры наряду с механическими преобразователями содержат в составе измерительной цепи магнитный индукционный преобразователь.

3. *Электрические* тахометры наряду с другими содержат в измерительной цепи электромеханические преобразователи, к ним относятся:

- *электромашинные тахометры;*
- *электроимпульсные тахометры;*
- *фотоэлектрические тахометры.*

4. *Оптические* тахометры, к ним относятся:

- *стробоскопические тахометры*, основаны на применении стробоскопического эффекта;
- *лазерные и инфракрасные тахометры*, используют лазерный или инфракрасный луч для контроля вращения любого тела.

По характеру использования (назначению) приборы подразделяют на *стационарные* и *переносные*.

Стационарные приборы предназначены в основном для выполнения постоянного измерения скорости какого-либо объекта, они соединяются с основным валом этого объекта посредством специального передаточного устройства.

Переносные (ручные) тахометры присоединяются к контролируемому валу только на время измерения скорости вращения.

По методу измерения различают тахометры, работающие *контактным* и *бесконтактным* методами. К *контактным* тахометрам относятся все вышеперечисленные приборы. Стробоскопические, лазерные, инфракрасные и несколько разновидностей электроимпульсных тахометров работают по *бесконтактному* методу.

Порядок выполнения работы

Лабораторная установка (рис. 11.6) состоит из электродвигателя 1 и реостата 2 для изменения частоты вращения вала электродвигателя 4 регулированием напряжения питания электродвигателя, диска 5 на валу электродвигателя, вольтметра 3, ручного тахометра 6.

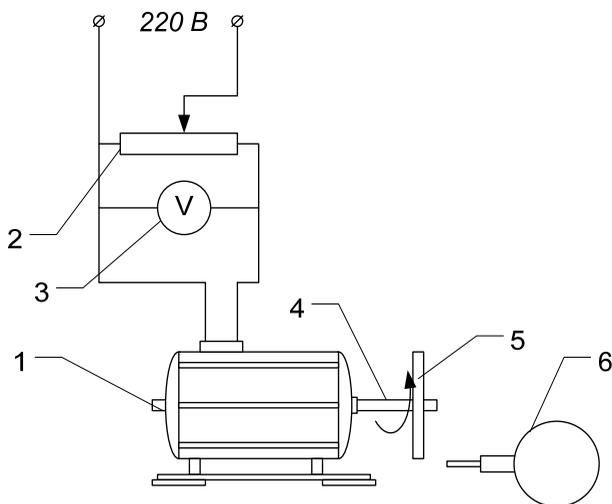


Рис. 11.6. Схема лабораторной установки

Для выполнения лабораторной работы: получить измерительные приборы, произвести их визуальный осмотр, ознакомиться с конструкцией и принципом действия тахометров и паспортом приборов.

Включить лабораторную работу в электрическую сеть. Передвинуть рукоять реостата 2 в крайнее положение, измерить с помощью вольтметра 3 напряжение питания электродвигателя 1. Определить частоту вращения электродвигателя вала двигателя с помощью тахометров. Повторить измерение не менее трех раз. Полученные результаты занести в табл. 11.1. Изменить напряжение питания электродвигателя не менее трех раз, проводя измерения частоты вращения электродвигателя вала двигателя с помощью тахометров. Полученные результаты занести в табл. 11.1. По окончании работы выключить лабораторную работу.

Рассчитать угловую скорость вращения и ротора диска по формуле $\omega = 2\pi n$, (1/с), где n – измеренная частота вращения (число оборотов), об/мин.

Рассчитать угловую скорость вращения и ротора диска по формуле $\omega = \frac{v}{r}$, (1/с), где v – линейная скорость вращения, м/мин, r – расстояние от точки измерения до оси вращения, м.

Полученные результаты занести в табл. 11.1. Построить графики зависимости частоты вращения двигателя от напряжения $n = f(U)$ и $\omega = f(U)$, $v = f(U)$ для тахометра.

Таблица 11.1

Таблица результатов измерений и расчетов

№п/п	Тахометр	U, В	n, об/мин			ω_1 , 1/с	u, м/мин			r, м	ω_2 , 1/с
			n_1	n_2	n_3		u_1	u_2	u_3		

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учебник для ВУЗов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: издательство МЭИ, 2005. – 460 с.
2. Назаров, В. И. Теплотехнические измерения и приборы : учебное пособие для ВУЗов / В. И. Назаров, В. А. Чиж, А. Л. Бу-ров. – Минск: издательство «Технопреспектива», 2008. – 174 с.
3. Сажин, С. Г. Средства автоматического контроля технологи-ческих параметров : учебник / С. Г. Сажин. – СПб.: издательство «Лань», 2014. – 368 с.: ил.
4. Калиниченко, А. В. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике /А. В. Калиниченко, Н. В. Ува-ров, В. В. Дойников. – Москва: Инфра-Инженерия, 2008. – 576 с.
5. Мулев, Ю. В. Манометры / Ю. В. Мулев. – Москва: издатель-ство МЭИ, 2003. – 279 с.
6. Некрашевич, В. А. Приборы учета энергоресурсов / В. А. Не-крашевич. – Минск: УП «Белэнергосбережение», 2001. – 115 с.
7. Каханович, В. С. Измерение расхода вещества и тепла при переменных параметрах / В. С. Каханович. – Москва: Энергия, 1990. – 125 с.
8. Преображенский, В. П. Теплотехнические измерения и при-боры / В. П. Преображенский. – 3-е изд. перераб. – Москва: Энер-гия, 1978. – 690 с.
9. Мухин, В. С. Приборы контроля и средства автоматики теп-ловых процессов / В. С. Мухин, И. А. Саков – Москва: Высшая школа, 1988. – 256 с.
10. Назаров, В. И. Теплотехнические измерения и приборы. Ла-бораторный практикум : учебное пособие / В. И. Назаров, А. Л. Бу-ров, Е. Н. Криксина. – Минск: Вышэйшая школа, 2012. – 131 с.: ил.
11. Лабораторные работы (практикум) по дисциплине «Тепло-технические измерения» для студентов специальности Т.01.02.00-«Теплоэнергетика», Т.01.03.00-«Автоматизация и управление энер-гетическими процессами», специализации Т.01.03.03-«Автомати-зация и управление теплоэнергетическими процессами на тепловых станциях» : учебно-методическое пособие / сост.: Г. Т. Кулаков, В. И. Назаров, В. А. Чиж. – Минск, 2001. – 102 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОМЕТРОВ РАСШИРЕНИЯ	3
Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....	12
Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ	20
Лабораторная работа № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ (ИНЕРЦИОННОЙ) ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	30
Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ИНФРАКРАСНОГО ПИРОМЕТРА	38
Лабораторная работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТНЫХ МАНОМЕТРОВ И ДИФМАНОМЕТРОВ	44
Лабораторная работа № 7. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВА ДЕФОРМАЦИОННЫХ МАНОМЕТРОВ И ДИФМАНОМЕТРОВ.....	55
Лабораторная работа № 8. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ	63
Лабораторная работа № 9. МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ И ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ	71
Лабораторная работа № 10. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА И ГАЗОВ	80
Лабораторная работа № 11. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ.....	87
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	90

Учебное издание

КЛИМОВИЧ Сергей Викторович
ЯНЦЕВИЧ Ирина Владимировна

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Пособие для студентов специальности
1-36 20 01 «Низкотемпературная техника»

Редактор *Ю. В. Ходочинская*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 30.04.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 4,18. Тираж 100. Заказ 314.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.