

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе Т-1

**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХА»**

по дисциплине

«Техническая термодинамика»

**для студентов специальности «Теплогазоснабжение, вентиляция и
охрана воздушного бассейна» дневной формы обучения**

Брест 2012

УДК 536.782(076.5)

Методические указания предназначены для студентов специальности «Теплогасоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» дневной формы обучения, выполняющих лабораторные работы по технической термодинамике. Указания содержат теоретические сведения, описание методики измерения основных термодинамических параметров: давления и температуры, методы обработки экспериментальных данных с учетом погрешностей, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители: Т.Л. Кушнер, к.ф.-м.н., доцент
Л.П. Щербаченко, ассистент, магистр физико-математических наук

Рецензент: А.Ф. Ревинский, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики
учреждения образования «Брестский государственный университет»

1. **Цель работы:** получение навыков измерений барометрического давления и температуры атмосферного воздуха, вычисление некоторых термодинамических характеристик воздуха.

2. **Приборы и принадлежности:** барометр-анероид, мультиметр или термометр, калькулятор.

3. Теоретические сведения

Введем основные понятия и определения в термодинамике. **Термодинамическая система, или рабочее тело,** – это объект исследования в термодинамике. **Термодинамические параметры состояния** системы – физические величины, характеризующие систему (или рабочее тело) в состоянии термодинамического равновесия. Параметры состояния не зависят от предыдущей «истории» системы и изменяются только в результате взаимодействия системы с окружающей средой или другими рабочими телами.

В настоящей лабораторной работе исследуется воздух как рабочее тело. Основными параметрами состояния воздуха являются: абсолютное давление (p), абсолютная температура (T) и удельный объем (v).

Абсолютное давление – физическая величина, равная силе, действующей по нормали к поверхности, отнесённой к единице площади этой поверхности. В системе СИ давление измеряется в паскалях (Па). Могут применяться также и другие, внесистемные единицы. Соотношения между различными единицами измерения давления приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношения между различными единицами измерения давления

Единица	Наименование единицы				
	Па	бар	кгс/см ²	мм рт.ст.	мм вод.ст.
1 Па	1	10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁵	7,5024·10 ⁻³	0,102
1 бар	10 ⁵	1	1,02	7,5024·10 ²	1,02·10 ³
1 кгс/см ²	9,8067·10 ⁴	0,98067	1	735	10 ⁴
1 мм рт.ст.	133	1,33·10 ⁻³	1,36·10 ⁻³	1	13,6
1 мм вод.ст.	9,8067	9,8067·10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	7,35·10 ⁻²	1

Удельный объём – объём, занимаемый единицей массы вещества. В системе СИ удельный объём измеряется в м³/кг. Также могут применяться см³/г.

Абсолютная температура – физическая величина, характеризующая тепловое состояние тела (или вещества). Для количественного измерения температуры необходимо установить числовую шкалу. В настоящее время по решению XI Генеральной конференции по мерам и весам (1968 год) в физических измерениях применяются две температурные шкалы: **международная практическая** и **термодинамическая**. Международная практическая шкала градуирована в градусах Цельсия (°C). Эта шкала определяется двумя реперными точками: 0°C и 100°C – соответственно температуры замерзания и кипения воды при давлении $p=1,0\cdot 10^5$ Па. Термодинамическая температурная шкала градуируется в кельвинах (К) и определяется по одной реперной точке. Это так называемая тройная точка воды – температура, при которой лёд, вода и насыщенный пар при давлении 609 Па находятся в термодинамическом равновесии. Температура тройной точки равна 273,16 К. Но, кроме вышеперечисленных шкал, могут применяться и другие (Фаренгейта, Ренкина, Реомюра). Соотношения для различных температурных шкал приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Соотношения между различными температурными шкалами

Наименование шкалы	Шкала Цельсия, °C	Шкала Ренкина, °Ra	Шкала Фаренгейта, °F	Шкала Реомюра, °R
Шкала Цельсия, °C	1	$0,56 \cdot t^{\circ}\text{Ra} - 273,15$	$0,56 \cdot t^{\circ}\text{F} - 17,78$	$1,25 \cdot t^{\circ}\text{R}$
Шкала Ренкина, °Ra	$1,8 \cdot t^{\circ}\text{C} + 491,7$	1	$t^{\circ}\text{F} + 459,67$	$1,8 \cdot (1,25 \cdot t^{\circ}\text{R} + 273,15)$
Шкала Фаренгейта, °F	$1,8 \cdot t^{\circ}\text{C} + 32$	$t^{\circ}\text{Ra} - 459,67$	1	$2,25 \cdot t^{\circ}\text{R} + 32$
Шкала Реомюра, °R	$0,8 \cdot t^{\circ}\text{C}$	$0,44 \cdot t^{\circ}\text{Ra} - 218,52$	$0,44 \cdot t^{\circ}\text{F} - 14,2$	1

Состояние термодинамической системы определено однозначно, если известны функциональные соотношения

$$p = f_1(T; v); v = f_2(p; T); T = f_3(p; v). \quad (1)$$

Уравнение состояния – равенство, которое связывает между собой основные параметры состояния

$$f(p; v; T) = 0. \quad (2)$$

Если воздух рассматривать как идеальный газ, то его состояние можно описать уравнением Клапейрона

$$p \cdot v = R \cdot T, \quad (3)$$

где p – абсолютное давление; v – удельный объем; T – абсолютная температура; $R = \frac{(\mu R)}{\mu}$ – газовая постоянная воздуха; μ – молярная масса воздуха; (μR) – универсальная газовая постоянная.

Приведем единицы измерения газовой постоянной $[R] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ и универсальной газовой постоянной – $[\mu R] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Также состояние воздуха как идеального газа описывается уравнением Менделеева-Клапейрона

$$p \cdot V = \frac{m \cdot (\mu R) \cdot T}{\mu}, \quad (4)$$

где m – масса воздуха; V – объем, занимаемый воздухом.

Сравнив уравнения (3) и (4), можно установить, что удельный объем определяется формулой

$$v = \frac{V}{m}. \quad (5)$$

Плотность газа можно найти следующим образом

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}. \quad (6)$$

Из уравнения (3) следует, что

$$p \cdot \frac{1}{\rho} = R \cdot T. \quad (7)$$

Тогда

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{p \cdot \mu}{(\mu R) \cdot T} \quad (8)$$

Согласно **закону Авогадро**, одинаковые объёмы различных газов при одинаковых давлении и температуре содержат одинаковое количество молекул. Давление воздуха $p_0=101325$ Па и температура $T_0=273,15$ К называются **нормальными физическими условиями** (НФУ). При таких условиях 1 моль любого идеального газа занимает объём $V=22,4143$ л= $22,4143 \cdot 10^{-3}$ м³, который называется молярным объёмом и обозначается ν_μ или ($\mu\nu$). Единицы измерения молярного объёма $[\mu\nu] = \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$. Используя значение молярного объёма, можно рассчитать универсальную газовую постоянную

$$\mu R = \frac{p_0 \cdot (\mu\nu)}{T_0} = \frac{101325 \cdot 22,4143 \cdot 10^{-3}}{273,15} = 8,3142 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad (9)$$

4. Экспериментальная часть

В работе необходимо измерить два термодинамических параметра, характеризующих воздух, – абсолютное давление и абсолютную температуру.

Давление измеряется барометром. Барометр-анероид включает в себя механизм, основными частями которого являются две стрелки со шкалой и анероидные коробки, заключенные в корпус. Фиксирующая стрелка может поворачиваться при помощи ручки, расположенной в центре стеклянной части корпуса. Она не участвует в измерениях, а предназначена лишь для фиксации показаний.

Температуру, как правило, измеряют ртутным или цифровым термометром. В данной работе температура будет измеряться мультиметром.

Портативный мультиметр предназначен для измерения постоянного и переменного напряжения, постоянного тока, сопротивления и т.д. Кроме того, некоторые модели мультиметров позволяют измерять температуру. Для этого к гнездам мультиметра подсоединяется термопара. Входные гнезда прибора защищены предохранителем. Имеется индикатор, предупреждающий о недостаточном уровне заряда батареи в питании прибора. Мультиметр предназначен для бытовых и лабораторных применений

4.1. Методика измерения давления

4.1.1. Совместите фиксирующую стрелку барометра с показывающей.

4.1.2. Перед измерением слегка постучите пишущей частью карандаша или ручки по стеклу для того, чтобы устранить искажения показаний из-за трения.

4.1.3. Снимите показания барометра.

4.2. Методика измерения температуры

4.2.1. Убедитесь в том, что изоляция измерительных шупов термопары не повреждена. Подключите термопару к входным терминалам: на лицевой панели прибора к гнезду «VΩmA» подсоедините красный измерительный шуп, к гнезду «COM» – черный измерительный шуп.

4.2.2. Установите поворотный переключатель функций в положение «TEMP», на дисплее появится значение температуры окружающей среды в градусах Цельсия.

4.2.3. Снимите показания мультиметра.

5. Задания для самостоятельной работы

5.1. Измерьте давление, руководствуясь пунктами 4.1.1.–4.1.3. предыдущего раздела.

5.2. Измерьте температуру в пяти – десяти разных точках лаборатории, руководствуясь пунктами 4.2.1.–4.2.3. предыдущего раздела.

5.3. Найдите среднюю температуру в лаборатории по формуле

$$\langle t \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

5.4. Переведите полученные после измерения величины давления и температуры в единицы СИ и другие, внесистемные единицы.

5.5. Используя приведенные в разделе 3 данные нормальных физических условий, вычислите удельный объем воздуха, соответствующий давлению p и температуре $\langle T \rangle$, по формуле

$$v = v_0 \cdot \frac{T \cdot p_0}{T_0 \cdot p} \quad (10)$$

Температуру $\langle T \rangle$ необходимо найти следующим образом: $\langle T \rangle = \langle t \rangle + 273,15$.

5.6. Считая размеры лаборатории известными (ширина $a=10,7$ м, длина $b=6,2$ м, высота $h=3,2$ м), из формулы (4) определите массу m воздуха в помещении, соответствующую температуре T_i , а из формулы (6) – его плотность ρ .

5.7. Из формулы (3) определите газовую постоянную воздуха.

5.8. Рассчитайте погрешности измеренных величин Δp и ΔT .

5.9. Рассчитайте погрешности косвенных вычислений удельного объема Δv , плотности $\Delta \rho$, массы Δm , газовой постоянной воздуха ΔR (по согласованию с преподавателем).

5.10. По результатам работы сделайте выводы.

6. Обработка результатов эксперимента. Расчет погрешностей

Давление и температура измеряются непосредственно приборами. Следовательно, для этих параметров можно рассчитать погрешности прямых измерений.

6.1. Погрешность разброса

Последовательно выполните следующие вычисления

Найдите среднее значение абсолютной температуры $\langle T \rangle$, используя данные измерений из п. 5.3.

$$\langle T \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (11)$$

где T_i – значение абсолютной температуры, соответствующее измеренному мультиметром (или термометром) значению t_i ; n – количество измерений.

Найдите отклонение от среднего

$$\Delta T_i = \langle T \rangle - T_i. \quad (12)$$

Найдите среднюю квадратичную ошибку отдельного измерения

$$\Delta T_{изм} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2}{n-1}}. \quad (13)$$

Найдите погрешность разброса $\Delta T_{разбр}$ по формуле

$$\Delta T_{разбр} = t_{n,p} \cdot \frac{\Delta T_{изм}}{\sqrt{n}} = t_{n,p} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (14)$$

где $t_{n,p}$ – коэффициент Стьюдента. Индекс n у коэффициента указывает число опытов, а индекс P – доверительную вероятность.

Значения коэффициентов Стьюдента приведены в таблице 3 для доверительной вероятности $P=0,95$, которая принята в лабораторном практикуме.

Таблица 3 – Значения коэффициентов Стьюдента для $P=0,95$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{n,p}$	1,60	0,82	0,77	0,74	0,73	0,72	0,71	0,71	0,70

6.2. Погрешность округления

Максимальная абсолютная ошибка, обусловленная неточностью отсчета и округления, определяется по формуле

$$\Delta T_{окр} = k \cdot X_{min}, \quad (15)$$

где X_{min} – минимальная цена деления прибора; k – абсолютный коэффициент отсчета.

Если визуально исследователь может разделить цену деления только пополам и округление ведёт до целого, то $k=0,5$. При округлении до половины деления $k=0,3$. В случае цифрового мультиметра примите $k=0,5$.

6.3. Погрешность прибора

Для определения погрешности прибора необходимо знать его класс точности. Класс точности – это величина, указывающая в процентах ошибку прибора от максимального показания шкалы. Тогда, если максимальное показание шкалы, например, взять за 100%, то погрешность прибора составит

$$\Delta T_{пр} = \frac{K \cdot T_{max}}{100}, \quad (16)$$

где K – класс точности прибора; T_{max} – максимальное значение, соответствующее максимальному показанию.

Если класс точности мультиметра (или термометра) не указан, то погрешность прибора можно считать равной половине минимальной цены деления прибора.

6.4. Полная погрешность прямого измерения

Погрешности, вычисленные в пунктах 6.1–6.3, дают возможность рассчитать погрешность измерения температуры

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta T_{разбр})^2 + (\Delta T_{окр})^2 + (\Delta T_{пр})^2}. \quad (17)$$

Аналогичным образом вычисляется погрешность измерения давления. Разумеется, во всех формулах, описанных в пунктах 6.1–6.4, нужно использовать обозначение p . Для приборов, измеряющих давление, установлены следующие классы точности: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Как правило, эта цифра указывается на передней панели прибора в правом (или левом) нижнем углу.

6.5. Погрешности косвенных измерений

Поскольку любое прямое измерение неизбежно имеет определенную погрешность, то и величины, вычисляемые из результатов прямых измерений, также будут иметь некоторую погрешность. В этом случае говорят о погрешности косвенных измерений (вычислений).

Методика вычисления погрешностей косвенных измерений подробно рассматривалась в лабораторном физпрактикуме в разделах «Механика» и «Электричество». В данной лабораторной работе можно определить погрешности вычисления удельного объема (v), газовой постоянной (R), плотности (ρ) и массы (m) воздуха.

В самом общем виде точность вычисления удельного объема v зависит от погрешности измеренных давления и температуры, а также от погрешности констант v_0 , p_0 , T_0 . Тогда, согласно правилу нахождения погрешностей косвенных измерений:

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial p} \cdot \Delta p\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \cdot \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial v_0} \cdot \Delta v_0\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial p_0} \cdot \Delta p_0\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial T_0} \cdot \Delta T_0\right)^2}, \quad (18)$$

где $\frac{\partial v}{\partial p}$, $\frac{\partial v}{\partial T}$, $\frac{\partial v}{\partial v_0}$, $\frac{\partial v}{\partial p_0}$, $\frac{\partial v}{\partial T_0}$ – частные производные, взятые от функции, описываемой уравнением (10), по величинам p , T , v_0 , p_0 , T_0 , а Δp , ΔT , Δv_0 , Δp_0 , ΔT_0 – их погрешности соответственно.

Для нахождения погрешности констант необходимо руководствоваться следующим правилом: погрешность любого числа составляет половину разряда последней значащей цифры. Например, если давление $p_0=1,01325 \cdot 10^5$ Па, то $\Delta p_0=0,000005 \cdot 10^5$ Па, а если $v_0=22,4143 \cdot 10^{-3}$ м³/кг, то $\Delta v_0=0,00005 \cdot 10^{-3}$ м³/кг. Самостоятельно определите погрешность температуры T_0 , давления p_0 и удельного объема, используя их значения из таблицы 5. Вычисление погрешностей Δv проведите, разделившись на бригады в соответствии с таблицей 4.

Таблица 4 – Разделение группы студентов по бригадам

№ бригады	№ вариантов, входящих в бригаду
1	1, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31 и т.д.
2	2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32 и т.д.
3	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 и т.д.

Используйте значения постоянных величин, заданные в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры состояния (НФУ), заданные с различной точностью

Параметр	Бригада 1	Бригада 2	Бригада 3
p_0 , Па	$1,01 \cdot 10^5$	$1,013 \cdot 10^5$	$1,0133 \cdot 10^5$
T_0 , К	273,2	273,15	273
v_0 , м ³ /кг	$22,414 \cdot 10^{-3}$	$22,4 \cdot 10^{-3}$	$22,41 \cdot 10^{-3}$

7. Контрольные вопросы

1. Дайте определение идеального газа. Какой практический интерес представляет введение понятия идеального газа?
2. Что такое рабочее тело? Почему в качестве рабочего тела используются вещества в газообразном или парообразном состоянии?
3. Что такое термодинамический параметр состояния? Какие параметры приняты в технической термодинамике за основные?
4. Как можно вычислить газовую постоянную? Каковы единицы измерения этой величины?
5. Как связаны между собой термодинамические параметры состояния для идеального газа?
6. Сформулируйте закон Авогадро?
7. Как можно графически изобразить уравнение состояния? Что такое термодинамическая поверхность?
8. Дайте определение числу Лошмидта.
9. Опишите методику расчёта погрешностей прямых измерений.
10. Опишите методику расчёта погрешностей косвенных измерений.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Устройства для измерения температуры

Температура – скалярная физическая величина, характеризующая приходящуюся на одну степень свободы среднюю кинетическую энергию движения частиц макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия. В Международной системе единиц (СИ) термодинамическая температура входит в состав семи основных единиц и выражается в кельвинах. О значении температуры судят по изменению некоторых физических свойств. Например, по изменяющемуся объёму или давлению жидкости (газа), по величине электродвижущей силы, возникающей на спае двух разнородных металлов, и т.д.

Существует огромное множество различных устройств для измерения температуры: жидкостные и манометрические термометры, электрические термометры сопротивления, термопары (термоэлектрические термометры) в комплекте с потенциометром, оптические термометры и др. Известны также термометры абсолютные, радиационные, шумовые, акустические.

Для измерения термодинамической температуры выбирается некоторый термодинамический параметр вещества. Изменение этого параметра однозначно связывается с изменением температуры. Классическим примером термодинамического термометра может служить газовый термометр, в котором температуру определяют методом измерения давления газа в баллоне постоянного объёма. Термодинамические термометры – это очень сложные установки, которые невозможно использовать для практических целей. Поэтому большинство измерений производится с помощью практических термометров, которые являются вторичными, так как не могут непосредственно связывать какое-то свойство вещества с температурой. Для получения функции интерполяции они должны быть отградуированы в *реперных* точках международной температурной шкалы.

Жидкостные стеклянные термометры (термометры расширения)

Действие жидкостных термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термометрического вещества и оболочки, в которой оно находится (термометрического стекла или кварца). Несмотря на большое разнообразие конструкций, эти термометры относятся к одному из двух основных типов: палочные (рисунок 1, а) и с вложенной шкалой (рисунок 1, б).

Баллон и частично капиллярная трубка заполняются термометрическим веществом, а свободное пространство в капиллярной трубке и запасном резервуаре заполняется инертным газом или находится под вакуумом (при измерении температур ниже 373 К).

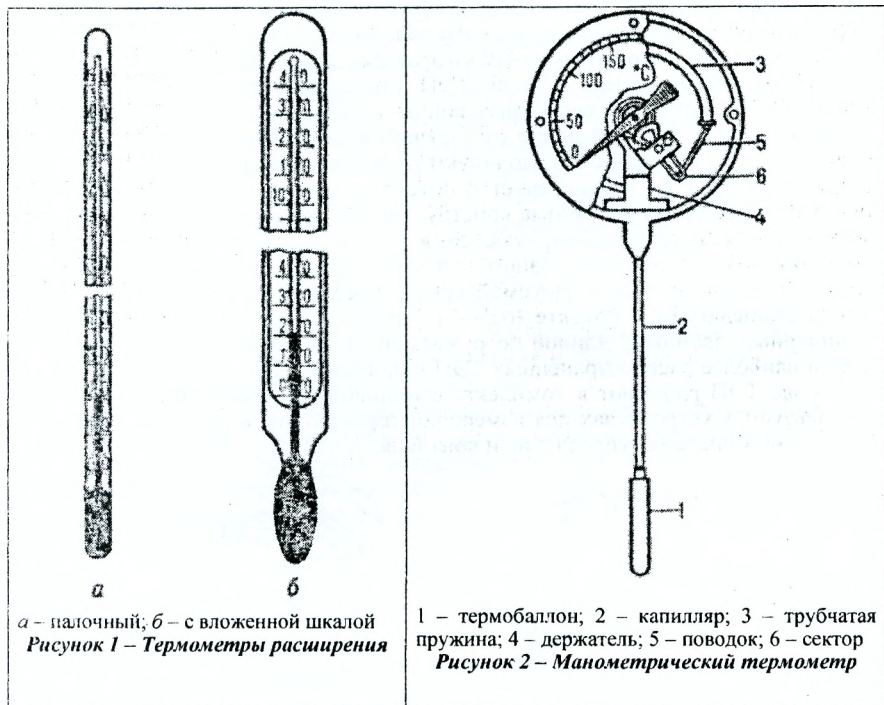
Особенно распространены ртутные стеклянные термометры. Ртуть не смачивает стекло и остается жидкой в широком интервале температур (от 238 до 875 К). Кроме ртути, используются этиловый и метиловый спирты, керосин, эфир, пентан, толуол, и другие жидкости. Среди приборов, заполненных органическими жидкостями и используемых лишь для измерения температур ниже -30°C , чаще других применяют спиртовые термометры. Все жидкостные термометры используют обычно для локальных измерений температуры (от -200 до 600°C) с точностью, определяемой ценой деления шкалы. Достоинства этих термометров – простота конструкции и высокая точность измерений. Недостатки: невозможность регистрации и передачи показаний на расстояние; зависимость показаний от измерения объемов жидкости и резервуара, в котором она находится; тепловая инерционность; невозможность ремонта в случае повреждения корпуса или внутренней трубки.

Манометрические термометры

Действие манометрических термометров основано на изменении давления рабочего вещества, заключенного в емкость постоянного объема, при изменении его температуры. По конструкции манометрические термометры всех типов практически одинаковы и состоят из термобаллона, манометрической трубчатой пружины (одно- или многовитковой, в виде сильфона) и соединяющего их капилляра (рисунок 2). При нагревании термобаллона, помещенного в зону измерения температуры, давление вещества внутри замкнутой системы возрастает. Это увеличение давления воспринимается пружиной, которая через передаточный механизм воздействует на стрелку прибора. В зависимости от того, чем заполнены термобаллоны, различают газовые, жидкостные и конденсационные термометры.

Биметаллический термометр

Термометр биметаллический относится к термометрам техническим, предназначенным для измерений температуры жидкостей и газов в отопительных и санитарных установках, в системах кондиционирования и вентиляции, а также для измерений температуры сыпучих и вязких сред в промышленности. Принцип действия биметаллических термометров основан на зависимости деформации чувствительного элемента от измеряемой температуры. В качестве чувствительного элемента используется биметаллическая пружина. Такая пружина изготавливается из двух прочно соединенных металлических пластин, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения. При изменении температуры пружина изгибается и вращает стрелку термометра. Один конец пружины закреплен внутри штока, а к другому присоединяется ось стрелки. Корпус биметаллического термометра изготавливается из хромированной или нержавеющей стали. Материал штока – латунь или нержавеющая сталь.



Термоэлектрические термометры (термопары)

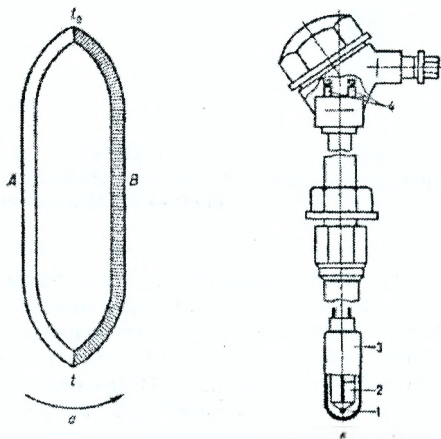
Принцип действия термоэлектрических термометров основан на свойстве двух разнородных проводников создавать электродвижущую силу при нагревании места их соединения (спаев). Проводники в этом случае называются термоэлектродами, а все устройство – термопарой. Величина термоэлектродвижущей силы (термоэдс) термопары зависит от материала электродов и разности температур горячего и холодного спаев. Поэтому при измерении температуры горячего спаев температуру холодного спаев стабилизируют или вводят поправку на ее изменение.

Термопары являются первичными преобразователями температуры в термоэлектродвижущую силу – сигнал, удобный для дистанционной передачи. Поэтому в измерительную цепь за термопарой может быть сразу включен прибор для измерения термоэлектродвижущей силы термопары. Обычно применяют автоматические потенциометры, милливольтметры и др.

Термоэлектрические термометры состоят из термоэлектрического преобразователя и вторичного прибора. Термоэлектрический преобразователь (ТЭП) (другое название термопары) представляет собой цепь, состоящую из двух или нескольких соединенных между собой разнородных электропроводящих элементов, обычно металлических проводников, реже – полупроводников (рисунок 3, а). Действие ТЭП основано на эффекте Зеебека: если контакты (как правило, спай) проводников (термоэлектродов) находятся при разных температурах, в це-

пи возникает термоэдс, значение которой однозначно определяется температурами «горячего», или рабочего (t), и «холодного», или свободного (t_0), контактов и природой материалов, из которых изготовлены термоэлектроды.

Проволочные термоэлектроды ТЭП помещают в стальной или керамический чехол, подключая свободные концы к выводам с крышкой; изолируют один от другого по всей длине от горячего спая керамическими изоляторами (рисунок 3, б). Рабочий спай изолируют от чехла керамическим наконечником. Горячая часть ТЭП контактирует с объектом измерения температуры. Стандартные ТЭП имеют различные конструктивные исполнения и могут отличаться следующими признаками: способами контакта с исследуемой средой (погружные и поверхностные); защиты от механических повреждений и химического воздействия контролируемой среды; инерционностью; числом зон контроля температуры в объекте (одно- и многозонные); числом рабочих спаев (одинарные, двойные); длиной погружаемой части и т.д. Основные характеристики наиболее распространенных ТЭП приведены в таблице 6. Для измерений термоэдс ТЭП работают в комплекте с вторичными приборами. ТЭП широко используют в устройствах для измерений температуры в различных автоматизированных системах управления и контроля.



а – цепь из термоэлектродов А и В; б – устройство преобразователя (1 – спай; 2 – изолятор; 3 – чехол; 4 – выводы электродов)

Рисунок 3 – Термоэлектрический преобразователь

Таблица 6 – Основные характеристики наиболее распространенных ТЭП

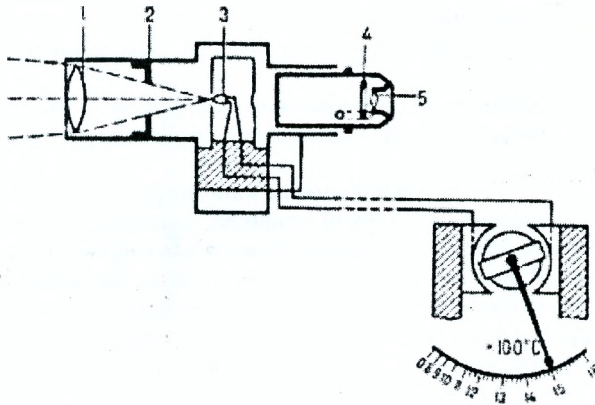
Материал термоэлектродов	Предел измерения температуры, °С			Термоэдс ($t=100^{\circ}\text{C}$, $t_0=0^{\circ}\text{C}$), мВ
	нижний	верхний		
		длительное применение	кратковременное применение	
Хромель-алюмель	-50	1000	1300	4,10
Хромель-копель	-50	600	800	6,95
Железо-копель	0	600	800	5,75
Железо-констант	-200	600	800	5,11
Медь-копель	-200	100	600	4,75
Медь-констант	-270	100	400	4,16

Пирометры

Известно, что все тела излучают электромагнитные волны, т.е. излучают тепло, в зависимости от их температуры. В процессе теплового излучения происходит перенос энергии, что позволяет измерять температуру тела на расстоянии. Длина волны излучения, как и энергия, зависят от температуры излучающего тела. То, насколько точным и эффективным будет измерение, связано со многими факторами (объекта измерения, окружающей среды и др.).

В идеале, объект измерения поглощает всю энергию и превращает ее в свое собственное тепловое излучение. В данном случае ссылаются на так называемый «излучатель черного тела». Данное тело является эталоном для идеального измерения, хотя на обычные тела влияют дополнительные виды излучения. Поэтому, для того чтобы достичь наиболее приемлемых результатов на практике с использованием инфракрасных измерительных систем, необходимо точно определить источники влияния, излучения и передачи энергии или устранить влияние излучения на объекты измерения.

Это можно сделать с помощью эталонных измерений, используя контактные термометры или благодаря какому-либо изменению поверхности, чтобы наиболее эффективно применить инфракрасную технологию. Возможно, например, покрасить поверхность измерения, использовать катализатор или клей, ластиковое покрытие или бумажные наклейки



1 – линза, 2 – диафрагма, 3 – приемник излучения, 4 – окуляр, 5 – светофильтр
Рисунок 4 – Пирометр полного излучения

Сфера применения пирометров достаточно широка: измерения температур опасных для человеческого организма поверхностей и сред, в том числе, горячих; измерение температурных показателей недоступных и труднодоступных объектов; сканирование для поиска холодных или горячих точек; диагностика электро- и теплооборудования; мгновенное определение температуры движущихся объектов; поддержание противопожарной безопасности; контроль и проверка систем кондиционирования, вентиляции и отопления и т.д.

Устройства для измерения давления

Абсолютное давление – физическая величина, равная силе, действующей по нормали к поверхности, отнесенной к единице площади этой поверхности. Измерения давления необходимы для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства. Кроме того, значение давления используется при косвенных измерениях других технологических параметров: уровня, расхода, температуры, плотности и т.д. В системе СИ за единицу давления принят паскаль (Па) по имени французского ученого Блеза Паскаля (1623-1662). 1 Паскаль – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м², расположенной перпендикулярно вектору силы.

Все приборы для измерения давления условно можно классифицировать по следующему признакам:

- роду измеряемой величины;
- принципу действия;
- классу точности.

По роду измеряемой величины приборы подразделяются на:

- 1) манометры – приборы для измерения положительного избыточного давления;
- 2) вакуумметры – приборы для измерения отрицательного избыточного давления;
- 3) моновакуумметры – приборы, позволяющие измерять как положительное, так и отрицательное избыточное давление;
- 4) дифференциальные манометры – приборы для измерения разности давлений в двух точках;
- 5) барометры – приборы для измерения атмосферного давления.

По принципу действия приборы подразделяются на следующие виды.

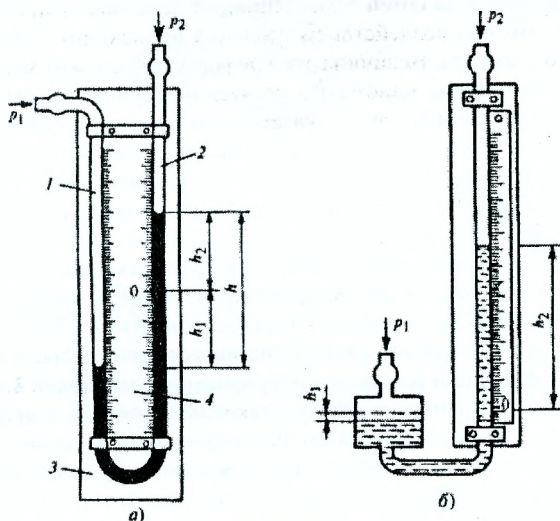
Жидкостные манометры

Основаны на гидростатическом принципе действия, т.е. измеряемое давление или разность давлений уравнивается давлением столба жидкости, высота которого определяется непосредственно или путем расчета. Впервые идея измерения давления по величине столба жидкости была высказана итальянским ученым Торричелли в 1640 г., а осуществлена итальянским механиком Вивиани в 1642 г. и французским ученым Паскалем в 1646 г. Жидкостные приборы не утратили своего значения до настоящего времени. Это объясняется тем, что принцип действия таких приборов очень прост. Они точны, надежны и просты в изготовлении.

В приборах используется принцип сообщающихся сосудов, в которых уровни рабочей жидкости совпадают при равенстве давлений над ними, а при неравенстве занимают такое положение, когда избыточное давление в одном из сосудов уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости в другом. Большинство жидкостных манометров имеют видимый уровень рабочей жидкости, по положению которого определяется значение измеряемого давления. Эти приборы используются в лабораторной практике и в некоторых отраслях промышленности.

Существует группа *жидкостных дифференциальных манометров*, в которых уровень рабочей жидкости непосредственно не наблюдается. Изменение последнего вызывает перемещение поплавка или изменение характеристик другого устройства, обеспечивающих либо непосредственное показание измеряемой величины с помощью отсчетного устройства, либо преобразование и передачу ее значения на расстояние.

Принципиальная схема U-образного манометра представлена на рисунке 5, а. Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1 и 2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреплена шкальная пластина 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.



1, 2 – сообщающиеся стеклянные трубки; 3 – основание; 4 – шкала измерений

Рисунок 5 – Схемы двухтрубного (а) и однотрубного (б) манометров

Избыточное давление определяется по формуле

$$p_{изб} = \rho g h,$$

где h – высота столба жидкости (м), ρ – плотность манометрической жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$), g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$).

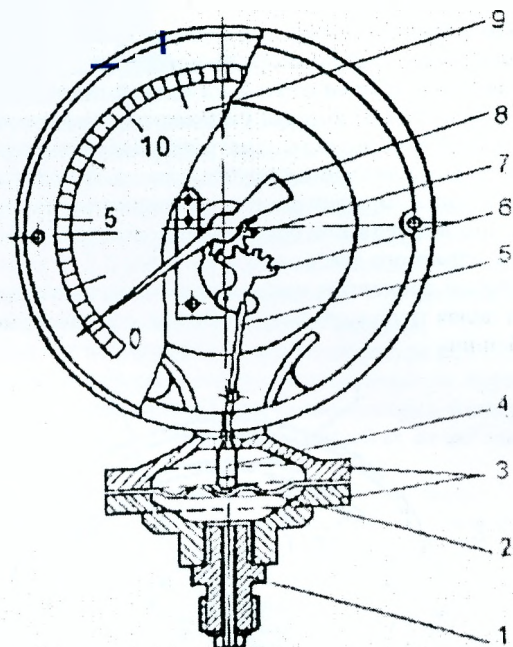
В качестве рабочей жидкости могут использоваться вода, ртуть, спирт, трансформаторное масло. В манометрах стеклянные трубки имеют, как правило, внутренний диаметр 8-10 мм. В этом случае исключено влияние капиллярных явлений. Если рабочей жидкостью служит спирт, то внутренний диаметр трубок может быть меньше. Двухтрубные манометры с водяным заполнением приме-

няются для измерения давления, разрежения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в диапазоне до ± 10 кПа. Заполнение манометра ртутью расширяет пределы измерения до $\pm 0,1$ МПа, при этом измеряемой средой может быть вода, неагрессивные жидкости и газы. При использовании жидкостных манометров для измерения разности давлений сред, находящихся под статическим давлением до 5 МПа, в конструкцию приборов вводятся дополнительные элементы, предназначенные для защиты прибора от одностороннего статического давления и проверки начального положения уровня рабочей жидкости.

Механические манометры

Механические приборы получили наибольшее распространение, так как имеют целый ряд преимуществ: простота устройства и использования, портативность, универсальность, практически неограниченный диапазон измерений: от нескольких кПа и до сотен МПа. Принцип действия таких приборов заключается в том, что под воздействием давления происходит деформация некоторого упругого элемента. Величина этой деформации служит мерой измеряемого давления. Механические манометры делятся на трубчатые, мембранные и пружинные. В трубчатом манометре указательная стрелка движется за счет деформации трубчатой пружины при изменении движения жидкости. Чувствительным элементом мембранных манометров служат плоские или гофрированные мембраны, связанные с указательной стрелкой. Повышение чувствительности мембранных манометров достигается заменой простых мембран анероидными коробками или применением гармоникообразных мембран – сильфонов.

На рисунке 6 показан манометр с гофрированной мембраной. На нижнем фланце манометра имеется ниппель 1 для подключения к сосуду, в котором измеряется давление. Верхний фланец составляет одно целое с корпусом манометра. Между фланцами находится гофрированная мембрана 2. Фланцы плотно стянуты болтами. В центре мембраны закреплена стойка, шарнирно соединенная с зубчатым сектором передаточного механизма. По величине деформации мембраны судят о давлении. Мембраны для измерения различных давлений отличаются толщиной, диаметром, видом материала и т.д. Пределы измеряемых давлений для мембранных манометров ограничены и составляют от 20 кПа до 30 МПа. Мембранные манометры используют при измерении давлений в высоковязких средах, так как прямой и широкий канал в ниппеле обеспечивает более свободный проход жидкости, чем в трубчатом манометре. Для измерений в химически агрессивных средах нижнюю сторону мембраны покрывают тонкой пленкой защитного материала. Принцип действия мембранного манометра позволяет использовать его и для измерения разрежения. Если мембранный манометр присоединить к полости с разрежением, то мембрана, испытывая атмосферное давление снаружи, будет прогибаться вовнутрь, что вызывает поворот стрелки в сторону, обратную по сравнению с манометром, и тогда прибор будет выполнять функции вакуумметра. Но в этом случае на такой принцип работы должна быть рассчитана шкала прибора, показывающая как избыточное давление, так и разрежение.



1 – ниппель; 2 – мембрана; 3 – фланцы; 4 – стержень; 5 – тяга;
6, 7 – передаточный узел; 8 – стрелка; 9 – шкала

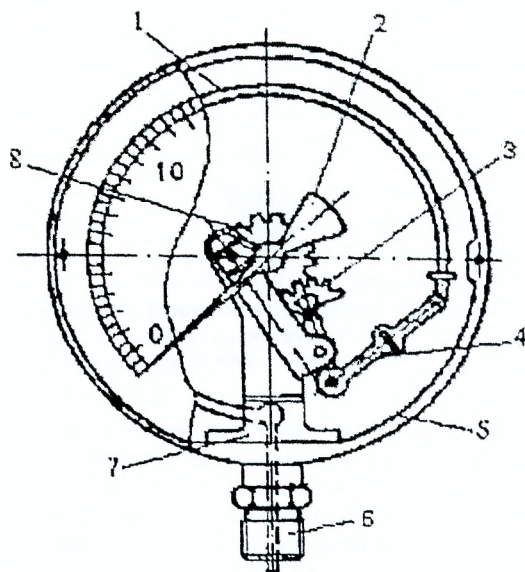
Рисунок 6 – Манометр с гофрированной мембраной

Сильфонные приборы для измерения давления являются еще одной разновидностью механических манометров. В качестве упругого элемента в них используется сильфон, который представляет собой гофрированную коробку, выполненную в виде цилиндра с равномерными складками (гофрами). Если такой сильфон подвергнуть воздействию избыточного давления снаружи или изнутри, то он сожмется или растянется по высоте так, что его горизонтальные поверхности будут перемещаться параллельно самим себе. Величина перемещения пропорциональна величине измеряемого давления. Сильфонные манометры применяются для измерения давлений от 40 кПа до 0,5 МПа. Изменение пределов измерения достигается за счет толщины мембраны, диаметра и размера гофр, а также жесткостью винтовой пружины, размещенной внутри полости сильфона.

Пружинные манометры появились на двести лет позднее жидкостных (1846-1848 гг.). Основной деталью пружинных манометров (см. рисунок 7) является полая трубка с поперечным сечением в виде овала или эллипса, которая по имени автора одного из первых таких приборов называется трубкой Бурдона. Один конец трубки заканчивается ниппелем с резьбой для подключения к

сосуду, в котором измеряется давление, а второй запаян. Свободный запаянный конец трубчатой пружины при помощи тяги шарнирно соединяется с зубчатым сектором, находящимся в зацеплении с маленькой шестеренкой (трибкой). На ось трибки насажена стрелка, которая указательным концом подходит к шкале, нанесенной на циферблате. Если манометр присоединить к полости с избыточным давлением, то силы давления в трубке несколько распрямляют ее, свободный конец трубки при этом перемещается, тяга поворачивает зубчатый сектор и находящуюся с ним в зацеплении трибку. По положению стрелки на шкале судят о величине измеряемого давления.

Чувствительным элементом манометров с многовитковой трубчатой пружиной является полая трубка овального сечения с 5-9 витками, расположенными по винтовой линии.



1 – трубчатая пружина; 2 – стрелка; 3 – зубчатый сектор; 4 – тяга;
5 – корпус манометра; 6 – ниппель; 7 – основание манометра; 8 – трибка

Рисунок 7 – Манометр с одновитковой трубчатой пружиной

Трубчатая пружина может быть использована и в вакуумметре. Если пружину соединить с пространством, в котором имеет место разрежение, то под действием внешнего атмосферного давления она деформируется. Причем свободный конец перемещается не вверх, как у манометра, а вниз. Соответственно и стрелка поворачивается в противоположную сторону. Шкала вакуумметра размечается в мм рт. ст. Предельное значение шкалы наносится условно, так как полный вакуум практически не достижим.

Если в одном и том же месте по условиям работы экспериментальной установки возможно и избыточное давление и вакуум, то используется комбинированный прибор, называемый мановакуумметром. Предельное значение шкалы манометрического давления может быть любым и зависит лишь от использованной в данном манометре трубки. Зная, на какое избыточное давление рассчитана трубка мановакуумметра, можно найти соотношение между длинами манометрической и вакуумметрической шкал. Так, если манометрическая шкала рассчитана на 1,0 МПа, вакуумметрическая шкала будет занимать 1/10 от шкалы давления, если на 2,0 МПа, то 1/20 и так далее. Чем больше избыточное давление, на которое рассчитан мановакуумметр, тем меньше размер вакуумметрической шкалы и ниже точность измерения вакуума.

Пружинные манометры применяют при температуре до 65°C, так как выше этой температуры механические свойства металлической пружины частично изменяются. Для измерения давления при более высоких температурах трубку манометра заполняют жидкостью, предохраняющей ее от воздействия высокой температуры.

Кроме вышеперечисленных приборов, существуют также:

- грузопоршневые манометры, в которых измеряемое давление, действуя на одну сторону поршня, уравновешивается внешней силой, приложенной с противоположной стороны поршня. В качестве равновесов используют грузы. Вес груза, отнесенный к площади поршня, определяет величину измеряемого давления. Поршневые манометры считаются образцовыми приборами для измерения высокого давления;
- электрические, в основу работы которых заложено изменение электрических свойств некоторых материалов или каких-либо электрических параметров, изменяющихся под воздействием давления;
- комбинированные манометры, принцип действия которых носит смешанный характер.

По точности выпускаемые приборы делятся на классы. От класса точности зависит погрешность прибора. Для приборов, измеряющих давление, установлены следующие классы: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5, 4,0.

Список литературы

1. Техническая термодинамика: учебн.: в 2-х ч. / Б.М. Хрусталеv, А.П. Нененчук, В.Н. Романюк [и др.] – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – Ч.1. – 474 с.
2. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с., ил.
3. Техническая термодинамика: учебник для машиностроительных специальностей вузов / Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высшая школа, 1991.
4. Юдаев, Б.Н. Техническая термодинамика: учебное пособие для неэнергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1988.

Составители:
Татьяна Леонидовна Кушнер
Лилия Павловна Щербаченко

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе Т–1

**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУХА»**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Техническая термодинамика»

для студентов специальности «Теплогасоснабжение, вентиляция и охрана
воздушного бассейна» дневной формы обучения

Ответственный за выпуск: Кушнер Т.Л.
Редактор: Боровикова Е.А.
Компьютерная верстка: Горун Л.Н.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано к печати 22.10.2012 г. Бумага «Снегурочка». Формат 60x84¹/₁₆.
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,25.
Заказ № 1131. Тираж 40 экз. Отпечатано на ризографе Учреждения образования
«Брестский государственный технический университет»
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.