

# ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

*Наука начинается тогда,  
когда начинают измерять.  
Д.И. Менделеев*

# ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

- 1. Общие сведения об измерениях
- 2. Погрешности измерений и их оценка
- 3. Измерение **температуры**
- 4. Измерение **давления**
- 5. Измерение **расхода**
- 6. Измерение **уровня**

# Общие сведения об измерениях

- **Виды измерений**
- **Средства измерения, их элементы и параметры**
- **Погрешности измерений и их оценка**
- **Общие сведения о погрешностях**
- **Метрологические характеристики средств измерения**

# Виды измерений

- **Измерение** - процесс нахождения значения физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств
- **Единица физической величины** - физическая величина, которой придано значение, равное единице
- **Результат измерения** – это численное значение величины, найденное путём её измерения (путём сравнения её с единицей измерения)

$$R = Q / q$$

Q – измеряемая величина; q – единица измерения; R – результат измерения

# Способы измерений (1)

- По способу измерений : прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения
- *Прямые измерения* - искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (измерения длины линейкой)
- *При косвенных измерениях* результат определяют из прямых измерений, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью (объем - результат трех линейных измерений)

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

## Способы измерений (2)

- **Совокупные измерения** - результат находят по данным повторных измерений одной или нескольких одноименных величин при различных сочетаниях мер или этих величин (массу отдельных гирь набора находят по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь)
- **Совместными измерениями** называют прямые или косвенные измерения двух или нескольких неоднородных величин с целью установление функциональной зависимости между величинами (измерения температуры, давления и объема, занимаемого газом, измерения длины тела в зависимости от температуры и т. д.)

# Принципы, средства и методы измерения

- ❑ Принцип измерения определяют *физические явления*
- ❑ Для реализации принципов измерения применяются различные *технические средства*
- ❑ Техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства, называется *средством измерения*
- ❑ Совокупность правил, определяющих принципы и средства измерения, называется *методом измерения*

# Средства измерений

- ❑ Измерительные *приборы* (аналоговые и цифровые, показывающие и регистрирующие)
- ❑ Измерительные *преобразователи, датчики, чувствительные элементы*
- ❑ Отсчётное *устройство, шкала, показания* измерительного прибора
- ❑ Информационно-измерительные *системы*
- ❑ Эталонные *средства измерения*
- ❑ Образцовые *средства измерения* (1-го 2-го и последующих разрядов)
- ❑ Рабочие *средства измерения*

# Методы измерений

- **метод непосредственной оценки**

значение измеряемой величины определяется непосредственно по отсчётному устройству измерительного прибора прямого действия

- **дифференциальный метод**

определяется разность измеряемой и базовой величин

- **нулевой метод**

измеряемую величину сравнивают с величиной, значение которой известно, но разность между ними сводится к нулю

# ВИДЫ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

- **систематические** - их величина одинакова во всех видах однотипных измерений, проведенных одинаковым способом
- **случайные** - их величина различна даже для измерений, проведенных одинаковым способом; случайные ошибки обязаны своим происхождением ряду причин, действие которых неодинаково в каждом опыте и не может быть учтено
- **приборные** - разность между показаниями прибора и истинным значением измеряемой величины, могут содержать случайную и систематическую составляющие
- **промахи (грубые ошибки)** - чаще всего источник этого вида ошибок - недостаток внимания экспериментатора

# СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

- 1. Ошибки, природа которых нам известна и величина которых может быть достаточно точно определена. Такие ошибки могут быть исключены введением соответствующих поправок.
- 2. Ошибки известного происхождения, но неизвестной величины. К их числу относятся погрешности измерительных приборов. Если на приборе указан класс точности 0.5, то это означает, что показания прибора верны с точностью до 0.5% от всей шкалы прибора. Систематические ошибки этого типа не могут быть исключены, но их наибольшее значение, как правило, известно.
- 3. Ошибки, о существовании которых мы не подозреваем, хотя величина их может быть очень значительна. Они чаще всего появляются при сложных измерениях. Такая ошибка может быть выявлена только при тщательной проверке всех этапов эксперимента, используя разные методики приготовления образцов и т. п.

# ПРИБОРНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ

- приборная погрешность - паспортная характеристика прибора
- определяется классом точности (максимально возможной относительной погрешности прибора, выраженной в процентах от величины верхнего предела шкалы)

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta x_i^{приб}}{x_{max}} \cdot 100\%$$

$\varepsilon_{max}$  - класс точности,  $\Delta x_i$  - максимально возможная абсолютная приборная погрешность  $i$ -го измерения,  $x_{max}$  - величина верхнего предела шкалы измерительного прибора

- максимальная относительная приборная погрешность  $i$ -го измерения

$$\varepsilon_i^{приб} = \frac{\varepsilon_{max} \cdot x_{max}}{x_i^{приб}}$$

# СЛУЧАЙНЫЕ ОШИБКИ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- Результаты измерений  $a$  - набор  $n$  различных чисел

$$a_1, a_2, \dots, a_n$$

- За наиболее вероятное значение величины  $a$  - среднее арифметическое значение результатов измерений

$$\langle a \rangle = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$$

- Абсолютной погрешностью  $i$ -го измерения  $\Delta a_i = a_i - \langle a \rangle$

- Относительной погрешностью  $i$ -го измерения  $\varepsilon_i = \frac{\Delta a_i}{\langle a \rangle}$

# СЛУЧАЙНЫЕ ОШИБКИ.

## ЗАКОН ГАУССА

Случайные ошибки могут быть количественно оценены при математической обработке экспериментальных данных.

- Для оценки случайной погрешности полагают, что наиболее близким к истинному значению измеряемой величины является среднеарифметическое значение результатов измерений.
- Это положение справедливо, если выполняется нормальный закон распределение случайных ошибок (закон Гаусса):
  - 1) Ошибки расположены в определенном интервале (относительно истинного значения величины) и могут принимать непрерывный ряд значений.
  - 2) Большие (по абсолютной величине) ошибки встречаются реже, чем меньшие, т.е. вероятность появления ошибки уменьшается с ростом ее абсолютной величины.
  - 3) При достаточно большом числе измерений случайные ошибки одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто.

# ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАУССА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

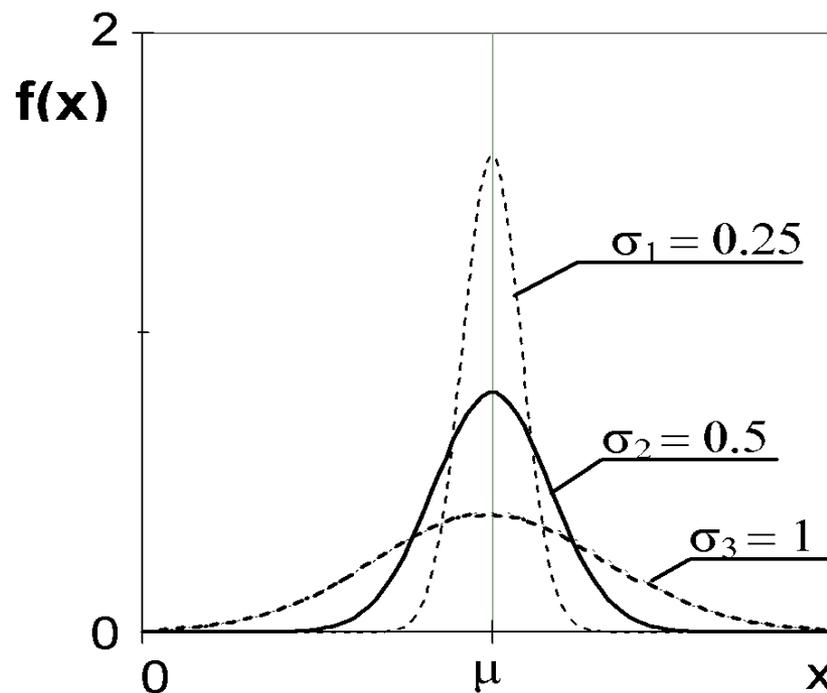
функция распределения  
непрерывной случайной  
величины  $x$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

где  $\mu$  и  $\sigma$  - параметры  
распределения

- $\mu$  - среднее значение  $\langle x \rangle$  случайной величины
- $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение случайной величины

- График функции Гаусса



# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

- Совокупность бесконечного числа значений - генеральной совокупностью
- Значения из генеральной совокупности, полученные в результате наблюдений, образуют выборку из генеральной совокупности
- характеристикой выборки является выборочное среднее

$$M(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- выборочная дисперсия (может служить оценкой генеральной дисперсии)

$$S^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} [x_i - M(x)]^2$$

- среднеквадратичное выборки или выборочный стандарт

$$S = \sqrt{S^2(x)}$$

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

- Задача статистического анализа - оценить параметры генеральной совокупности по результатам данной случайной выборки с учетом того элемента неопределенности, который вносится ограниченностью экспериментального материала.
- Выборку необходимо оценить, насколько надежно распространение ее параметров на генеральную совокупность, т.е. вычислить ее параметры.

# Последовательность оценки случайной выборки

- 1. Исключить известные систематические ошибки
- 2. Исключить "анормальные" результаты (промахи).
- 3. Вычислить среднеарифметическое (эта величина и будет считаться наиболее достоверным результатом измерений).
- 4. Вычислить среднеквадратическую ошибку
- 5. Оценить доверительные интервалы результатов измерений.

# ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

- среднеарифметическое значение измеряемой величины
- среднеквадратическое отклонение результатов измерений
- задать доверительную вероятность (надёжность)  $\alpha = 0,95$
- Определить доверительную ошибку с помощью критерия Стьюдента  $t$ , выбранного для заданной  $\alpha$  и  $n$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}$$

$$\varepsilon = t_p S_{\bar{X}}$$

**ЗНАЧЕНИЕ КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА  $t$  И КРИТЕРИЯ  $\beta$**   
**ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУБЫХ ОШИБОК ПРИ  $\alpha = 0,95$**

<b>Число опытов</b>	<b><math>t</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
<b>2</b>	<b>12,71</b>	<b>-</b>
<b>3</b>	<b>4,30</b>	<b>0,941</b>
<b>4</b>	<b>3,18</b>	<b>0,765</b>
<b>5</b>	<b>2,78</b>	<b>0,642</b>
<b>6</b>	<b>2,57</b>	<b>0,560</b>
<b>7</b>	<b>2,45</b>	<b>0,507</b>
<b>8</b>	<b>2,37</b>	<b>0,468</b>
<b>9</b>	<b>2,31</b>	<b>0,437</b>
<b>10</b>	<b>2,26</b>	<b>0,412</b>
<b>11</b>	<b>2,23</b>	<b>0,392</b>
<b>12</b>	<b>2,20</b>	<b>0,376</b>

# ГРАНИЦЫ НЕИСКЛЮЧЕННОЙ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ

$\theta_i$  - границы i-той неисключенной систематической погрешности;  $k$  - коэффициент, определяемый принятой доверит. вероятностью ( $k=1.1$  при  $\alpha=0.95$ )

Граница неисключенной приборной погрешности  $\theta_i = \gamma_0 X_k / 100$

( $\gamma_0$  - класс точности средства измерения;  $X_k$  - предел шкалы средства измерения)

- Граница погрешности результата измерения

$$\theta / S_{\bar{X}} < 0,8 \text{ --- } \Delta = \varepsilon; \quad > 0,8 / S_{\bar{X}} \Delta = \theta.$$

когда указанные неравенства не выполняются  $\Delta = k_1 S_{\Sigma}$

( $k_1$  - коэффициент, зависящий от соотношения случайных и неисключенных систематических погрешностей;  $S_{\Sigma}$  - оценка суммарного среднеквадратического отклонения результата измерения)

$$k_1 = \frac{\varepsilon + \theta}{S_{\bar{X}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2 / 3 + S_{\bar{X}}^2}} \quad S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2 / 3 + S_{\bar{X}}^2}$$

# ГРАНИЦЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{j=1}^L E_{j\text{отн}}^2 + \sum_{k=1}^M E_{( )k}^2}$$

$E_j$  - частная погрешность косвенного измерения;

$E_{(отн)k}^2$  - погрешность отнесения по  $k$ -му параметру состояния

$$E_j = \left( \frac{\partial Y}{\partial X_j} \right)_{X_1, X_2, \dots, X_{j-1}, X_{j+1}, \dots, X_L} \bullet \Delta X_j$$

погрешности отнесения по температуре и давлению

$$E_T = \left( \frac{\partial Y}{\partial T} \right)_P \bullet \Delta T \qquad E_P = \left( \frac{\partial Y}{\partial T} \right)_T \bullet \Delta P$$

# ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИЯХ КОМБИНАЦИЙ ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН

$a = f(x, y)$	$\Delta a =  \Delta a_x  +  \Delta a_y $	$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a}$
$x + y$	$ \Delta x  +  \Delta y $	$\frac{ \Delta x  +  \Delta y }{x + y}$
$x - y$	$ \Delta x  +  \Delta y $	$\frac{ \Delta x  +  \Delta y }{x - y}$
$x \cdot y$	$ x \cdot \Delta y  +  y \cdot \Delta x $	$\left  \frac{\Delta x}{x} \right  + \left  \frac{\Delta y}{y} \right $
$\frac{x}{y}$	$\frac{ x \cdot \Delta y  +  y \cdot \Delta x }{y^2}$	$\left  \frac{\Delta x}{x} \right  + \left  \frac{\Delta y}{y} \right $

# ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ВЕРОЯТНОСТИ

- вопрос: с какой достоверностью полученная выборка описывает истинное распределение (т.е. выборочное среднее или дисперсию)?
- Доверительная вероятность ( $\alpha$ ) – это вероятность того, что истинное значение измеряемой величины  $X$  находится внутри доверительного интервала

$$X - \varepsilon < X < X + \varepsilon$$

- $\varepsilon$  - доверительная ошибка
- Доверительную ошибку определяют с помощью критерия Стьюдента  $t$ , выбранного для заданной доверительной вероятности и числа проведенных измерений

$$\varepsilon = t S_{\bar{X}}$$

# ИСКЛЮЧЕНИЕ ГРУБЫХ ОШИБОК

- 1. Метод, основанный на оценке максимальных различий полученных результатов. Результаты измерений располагают в упорядоченный ряд по возрастающей величине, при этом наименьшему результату присваивают номер первый ( $X_1$ ), а максимальному – наибольший номер ( $X_n$ ). Затем для сомнительного результата рассчитывают соотношение

$$\beta = \frac{X_n - X_{(n-1)}}{X_n - X_1}, \quad \beta = \frac{X_2 - X_1}{X_n - X_1}.$$

Если полученное значение критерия  $\beta$  больше табличного, то этот результат является ошибочным.

- 2. Метод, основанный на критерии Стьюдента  
Проман, если  $|t_{\hat{e}}| \geq t_{\hat{e}}$ .

$$t_{\hat{e}} = \frac{\tilde{O}_{\hat{e}} - \bar{\tilde{O}}}{S_{X_{\hat{e}}}}$$

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ПОВТОРНОСТЕЙ ОПЫТА

- Какое количество опытов необходимо и достаточно для получения результата с заданной точностью?
- Проводят небольшое число (2-3) измерений, задаются значением доверительной вероятности и требуемым значением доверительной ошибки. Затем следует рассчитать среднеквадратическое отклонение и доверительную ошибку. Если полученное значение доверительной ошибки соответствует заданному, то проведенных измерений достаточно.
- В противном случае корректируют численное значение критерия Стьюдента подбором такого количества опытов, чтобы рассчитанное значение доверительной ошибки соответствовало заданному.

# ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ПОВТОРНОСТЕЙ ОПЫТА

- 2-3 измерения **56,47 56,07**
- задаёмся значением доверительной вероятности **(0,95)** и требуемым значением относительной ошибки **(1%)**

• 1.  $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$  **56,27**

5. (Табл)  $t_{таб} = 12,7$

• 2.  $S_{X_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$  **0,283**

6. **2,54**  $\varepsilon = t_p S_{\bar{X}}$

• 3.  $S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}$  **0,2**

7. **4,5%**  $\delta = \frac{\varepsilon}{X} 100\%$

• 4.  $f = n - 1$  **1**

$t_{рас} > t_{таб} ?$

• При  $n = 4, f = 3, t_{рас} = 4, t_{таб} = 3,18$

# Единицы измерения физических величин

используются для стандартизованного представления результатов измерений. Численное значение физической величины представляется как отношение измеренного значения к некоторому стандартному значению, которое и является единицей измерения

## Единицы СИ

- Основные  
метр | килограмм | секунда |  
ампер | кельвин | кандела |  
моль
- Производные  
радиан | стерadian | герц |  
градус Цельсия | катал |  
ньютон | джоуль | ватт |  
паскаль | кулон | вольт | ом |  
сименс | фарад | вебер | тесла |  
генри | люмен | люкс |  
беккерель | грей | зиверт

## Единицы IP

- 1 дюйм (*inch*) = 2,54 см
- 1 фут (*foot*) = 0,3048 м
- 1 ярд (*yard*) = 0,9144 м
  
- 1 фунт (*pound, lb*) = 453,592 г
- 1 унция (*ounce, oz*) = 28,349 г
  
- 1 галлон амер. = 3,784 л (дм<sup>3</sup>)
- 1 пинта жидкая амер. = 0,473 л (дм<sup>3</sup>)
- 1 унция жидкая = 29,56 мл (см<sup>3</sup>)

# Кратные и дольные приставки СИ

Дольность	Приставка	
	русская	международная
$10^{-1}$	деци	deci
$10^{-2}$	санти	centi
$10^{-3}$	милли	milli
$10^{-6}$	микро	micro
$10^{-9}$	<b>нано</b>	<b>nano</b>
$10^{-12}$	пико	pico
$10^{-15}$	фемто	femto
$10^{-18}$	атто	atto
$10^{-21}$	зепто	zepto
$10^{-24}$	йокто	yocto

Кратность	Приставка	
	русская	международная
$10^1$	дека	deca
$10^2$	гекто	hecto
$10^3$	кило	kilo
$10^6$	мега	Mega
$10^9$	гига	Giga
$10^{12}$	тера	Tera
$10^{15}$	пета	Peta
$10^{18}$	экса	Exa
$10^{21}$	зетта	Zetta
$10^{24}$	йотта	Yotta

# Измерение температуры

- Температура и температурные шкалы
- Термометры расширения
- Манометрические термометры
- Термоэлектрические термометры
- Методы измерения термо-ЭДС
- Термометры сопротивления (ТС)
- Схемы измерения сопротивления ТС
- Пирометры. Основы теории и методы измерения температуры тел по излучению
- Основные источники погрешностей при измерение температуры

# Температура и температурные шкалы

- *Температура* - мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул

$$E = (3/2)kT,$$

где  $k = 1,380 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана

- *Значение температуры можно определить только по измерениям других параметров, которые изменяются однозначно в зависимости от температуры* (объём, длина, электрическое сопротивление, термоэлектродвижущая сила, энергетическая яркость излучения и др.)

# Историческая справка

- 1592 Галилей (газовые термометры)
- 1631-1654 Ре (жидкостные термометры)
- Конец 17 века Санкторио (основы метрологии)
- 1701 Ньютон (2 реперные точки – 0 и 36,6°C)
- 1703 Амантон (0 K)
- 1714 Фаренгейт (ртуть, шкала, сер. производство)
- 1730 Реомюр (шкала)
- 1740 Исль (шкала-150)
- 1742 Цельсий (шкала-100)
- 1760 Ламберт (1 реперная точка)
- 1821 Зеебек (термоэлект. эффект)
- 1827 Ом (ТС – теория)
- 1843 Ренкин (шкала)
- 1848 Томсон (Кельвин) (термодин. шкала)
- 1871 Сименс (первый ТС)
- 1906 Шток и Нильсен (давл. насыщ. паров)

# Сравнение температурных шкал

Описание	Кельвин	Цельсий	Фаренгейт
Абсолютный ноль	0	-273.15	-459.67
Температура замерзания воды	273.15	0	32
Температура человеческого тела	310.0	36.6	98.2
Температура кипения воды	373.15	100	212
Плавление титана	1941	1668	3034

Пересчёт температуры между основными шкалами			
в\из	Кельвин	Цельсий	Фаренгейт
Кельвин (К)	= К	= C + 273	= (F + 459) / 1,8
Цельсий (°C)	= К - 273	= C	= (F - 32) / 1,8
Фаренгейт (°F)	= К · 1,8 - 459	= C · 1,8 + 32	= F

# Термодинамическая шкалы температур

- ❑ - *Не зависит* от термометрических свойств вещества
- ❑ - В основу построения взят *идеальный цикл Карно*, в котором работа цикла зависит только от температур начала и конца процесса
- ❑ - основной температурой является *термодинамическая температура*  $T$ , единица которой - кельвин (К) –  $1/273,16$  часть термодинамической температуры равновесия между твёрдой, жидкой и газообразной фазами воды (тройная точка воды)
- ❑ - построена только на *одной практически реализуемой реперной точке*, которая может быть воспроизведена с высокой точностью (0,0002 К)
- ❑ - вторая необходимая репер. точка – *теоретическая* (0 К)

## Международная практическая температурная шкала МПТШ-1968

- МПТШ-68 построена на **постоянных температурных (реперных) точках**, которые могут быть воспроизведены с необходимой точностью. Численные значения температур в этих точках определены на специальных установках **эталонными средствами измерения** по термодинамической шкале. Значения температур между реперными точками определяются с помощью **эталонных средств измерения** по интерполяционным формулам. По эталонным средствам измерения градуируются **образцовые средства измерения**, а по образцовым градуируются **рабочие средства измерения**. МПШТ-68 обеспечивает измерение температур в интервале от **13,81 до 6300 К**.

## Эталонные средства измерения

- ❑ В качестве **эталонного средства измерения** для области температур от 13,81 до 903,89 К (630,74°С) применяют **платиновый термометр сопротивления**.
- ❑ Для области температур от 630,74 до 1064,43°С в качестве эталонного применяется **платинородий-платиновый термоэлектрический термометр**.
- ❑ Для области температур от 1337,58 К (1064,3°С) до 6300 К применяется **квазимонохроматический пирометр**.

# Основные реперные точки МПТШ-1968

(13 точек)

Состояние фазового равновесия	T, K	t, °C
Аргон (Т-Ж-П)	83,80	-189,35
Кислород (Ж-П)	90,19	-182,96
Вода (Т-Ж-П)	273,16	0,01
Вода (Ж-П)	373,15	100,00
Олово (Т-Ж)	505,12	231,97

# Международная температурная шкала МТШ-90

- **МТШ-90** является практической температурной шкалой и заменяет собой предыдущую МПТШ-68. Основные изменения связаны с изменением **температур реперных точек, расширением диапазона определения шкалы, введением новых методик построения интерполяционных зависимостей для платиновых ТС.**

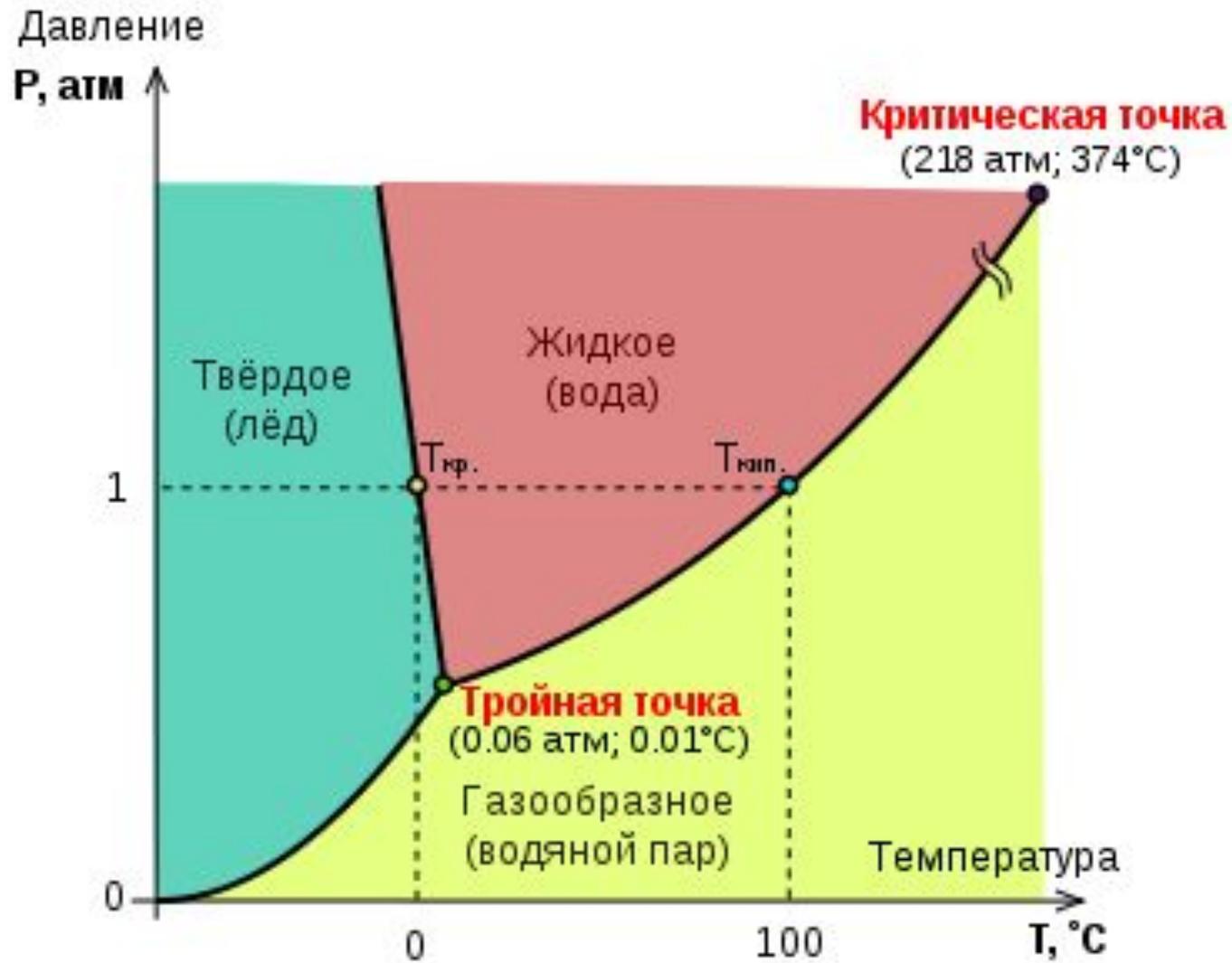
# ПНТШ-2000 (PLTS-2000) и Техническое приложение к МТШ-90

- **В 2000 г.** - Международный комитет по мерам и весам утвердил новую предварительную низкотемпературную международную шкалу ПНТШ-2000 (PLTS-2000), которая расширяет диапазон МТШ-90 в низкотемпературной области. Шкала начинается с температуры **0,902 мК**, соответствующей твердому состоянию  $^3\text{He}$  и доходит до температуры **1 К**, таким образом перекрывая диапазон МТШ-90 в интервале **0,65 -1 К**.
- **В 2005 г.** - Техническое приложение к МТШ-90. Дополнение касается определения **температуры тройной точки воды** и основано на результатах анализа расхождений значений температур ампул тройной точки воды, использующих воду разного изотопного состава.

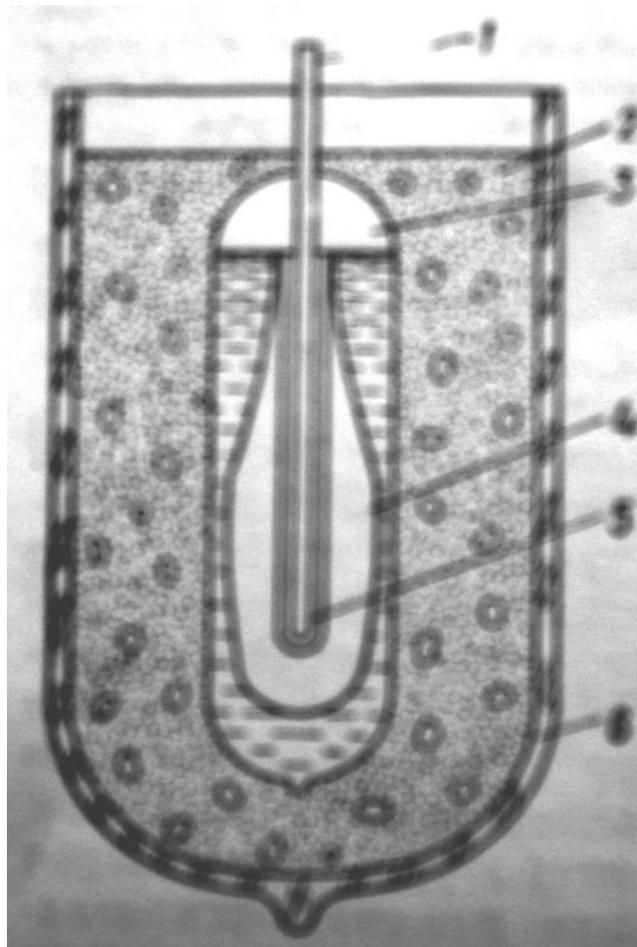
# Основные реперные точки МТШ-90 (16)

	<u>Реперная точка</u>	<u>T/K</u>	<u>t/°C</u>
Ne	Тройная точка	24.5561	-248.5939
O <sub>2</sub>	Тройная точка	54.3584	-218.7916
Ar	Тройная точка	83.8058	-189.3442
Hg	Тройная точка	234.3156	-38.8344
H <sub>2</sub> O	Тройная точка	273.16	0.01
Ga	Точка плавления	302.9146	29.7646
In	Точка затвердевания	429.7485	156.5985
Sn	Точка затвердевания	505.078	231.928
Zn	Точка затвердевания	692.677	419.527
Al	Точка затвердевания	933.473	660.323

# Фазовая диаграмма



# Воспроизведение тройной точки воды



# ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

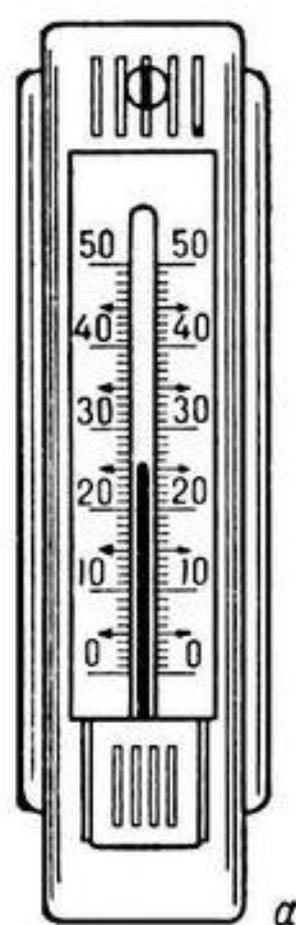
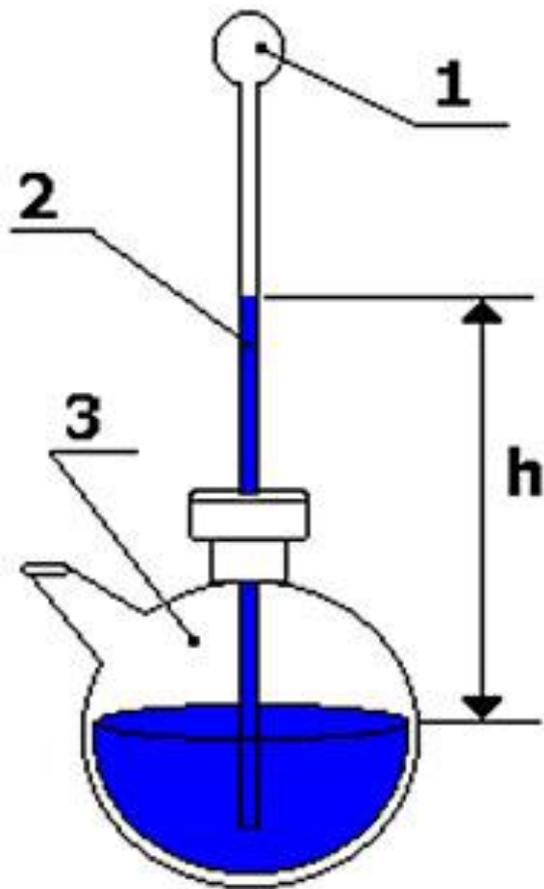
## Стеклянные жидкостные термометры

- ❑ **Принцип действия** стеклянных жидкостных термометров основан на тепловом расширении термометрической жидкости, заключенной в термометре
- ❑ **По конструкции** - палочные и с вложенной шкалой
- ❑ **Максимальные и минимальные термометры**
- ❑ **Требования** к термометрическим стеклам (старение и депрессия)
- ❑ **Поправка** на выступающий столбик (в град.):  $\delta(t) = n\beta(t - t_{вс})$
- ❑ **Смещение** нулевой точки термометра

# Термометрические жидкости

Жидкость	Температура затверд, °С	Температура кипения , °С	Пределы прим., °С	Кэфф. объём, расшир., $10^5$ 1/К	
Ртуть	-38,9	356,6	-35...600	18	
Толуол	-97,2	19,8	-90...200	109	
Этиловый спирт	-114,5	78,0	-80...70	105	
Керосин	-	-	-60...200	95	
Петролейный эфир	-	-	-120...25	152	
Пентан	-200	36,0	-200...20	92	

# ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

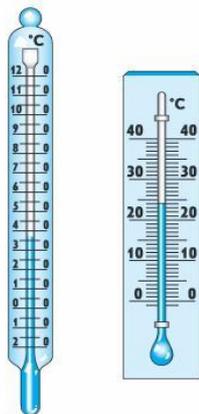


*а*



*б*

# ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ



# Термометр Галилея



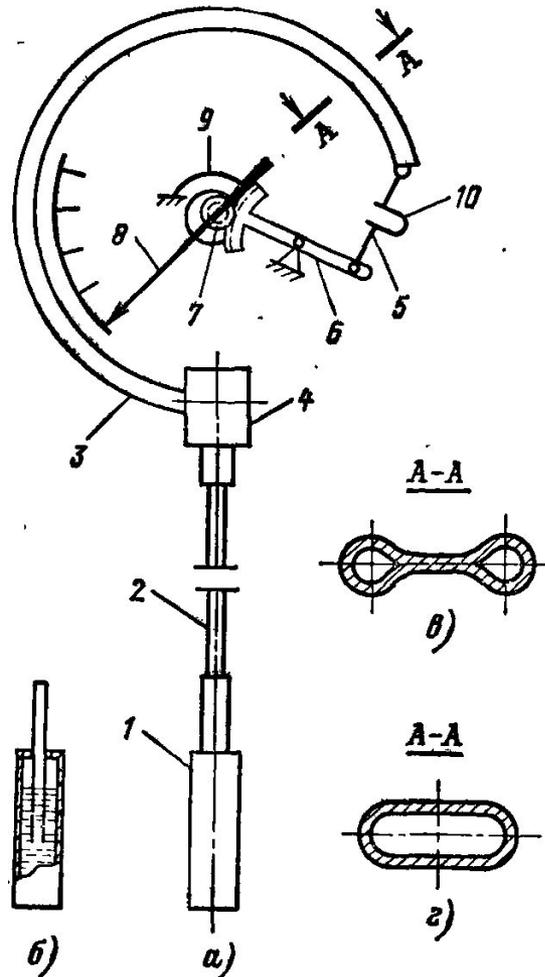
# ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

- ❑ - погрешности показаний термометров при нормальных условиях их работы (градуировочная погрешность, неравномерность сечения канала капилляра по его длине; нелинейная зависимость объемов термометрической жидкости и резервуара от температуры, старение термометра)
- ❑ - погрешности, являющиеся следствием отклонения условий измерения от нормальных (эффекта выступающего столбика жидкости, изменение внешнего и внутреннего давлений и др.)
- ❑ - погрешности, обусловленные дефектами термометра (разрывы столбика жидкости и др.)
- ❑ - погрешности измерения, вносимые наблюдателем (погрешности отсчета показаний, погрешности определения поправок и др.)

# Манометрические термометры

- **Действие основано** на использовании зависимости между температурой и давлением рабочего (термометрического) вещества в замкнутой герметичной термосистеме
- **Термосистема** состоит из термобаллона, капилляра и манометрической пружины
- **Подразделяются** на газовые, жидкостные и конденсационные
- **Газовые** - для измерения температур от  $-200$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ . В качестве рабочего вещества применяется азот
- **Жидкостные** - для измерения температуры от  $-150$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ . В качестве рабочего вещества применяют ртуть, пропиловый спирт, метаксиллол и др.
- **Конденсационные (парожидкостные)** - для измерения температур от  $-50$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ . Хладон-22, пропилен, хлористый метил, ацетон, этилбензол

# Манометрические термометры



## Схема манометрического термометра

- 1-термобаллон
- 2-капилляр
- 3-манометрической пружина
- 4-держатель
- 5-поводок
- 6-сектор
- 7-трибка
- 8-указательная стрелка
- 9-спиральный волосок

# ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

- ❖ - погрешности показаний при нормальных условиях работы (погрешности градуировки при изготовлении термометра, вариации показаний вследствие гистерезиса)
- ❖ - погрешности, являющиеся следствием отклонения условий измерения от нормальных (при отклонении температуры капилляра и манометрической пружины от нормальной, отклонении атмосферного давления от нормального и др.). *Для уменьшения дополнительной температурной погрешности в конструкциях манометрических термометров предусмотрены компенсирующие устройства*
- ❖ - погрешности отсчета показаний
- ❖ - условия теплообмена, нарушающие равенство температур между термобаллоном и измеряемой средой
- ❖ - тепловая инерционность термометров

# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- Зеебек - 1821 г.
- Измерение температур основано **на зависимости между термо-э. д. с.**, в цепи, составленной из разнородных проводников, и **температурами** мест их соединения
- термо-э. д. с. складывается из суммы **скачков потенциала в контактах (спаях) термопары** и суммы **изменений потенциала**, вызванных диффузией электронов, и зависит от рода проводников и их температуры
- термо-ЭДС цепи, составленной из **трёх разнородных проводников**, не отличается от термо-ЭДС цепи, составленной из **двух проводников**, если температура мест подсоединения третьего проводника равна
- рабочий конец термоэлектрического термометра можно изготавливать путём **сварки или пайки**, если температура во всех точках спая будет одинакова

# Эффект Зеебека

- В замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает **ЭДС (термоэдс)**, если места контактов поддерживают при разных температурах. Цепь, которая состоит из двух различных проводников называется термоэлементом или **термопарой**.
- Величина возникающей **термоэдс** зависит только от материала проводников и температур горячего ( $T_1$ ) и холодного ( $T_2$ ) контактов.
- В небольшом интервале температур **термоэдс**  $E$  можно считать пропорциональной разности температур
- 
- $E = \alpha_{12}(T_2 - T_1)$  где  $\alpha_{12}$  — коэффициент **термоэдс**
- В простейшем случае коэффициент **термоэдс** определяется только материалами проводников, однако строго говоря, он зависит и от температуры
- Более корректное выражение для **термоэдс**

$$\mathcal{E} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dT$$

# Объяснение эффекта Зеебека

- **1. Объёмная ЭДС** - различная зависимость средней энергии электронов от температуры в различных веществах

Электроны на горячем конце проводника приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.

# Объяснение эффекта Зеебека

- **2. Контактная ЭДС** - различная зависимость контактной разности потенциалов от температуры вызвана отличием **энергий Ферми** у различных контактирующих проводников. При создании контакта уровни Ферми становятся одинаковыми, и возникает **контактная разность потенциалов**

$$U = \frac{F_2 - F_1}{e}$$

где  $F$  — энергия Ферми,  $e$  — заряд электрона

На контакте тем самым существует электрическое поле, локализованное в тонком приконтактном слое.

Если температура одного из контактов изменится,  $U$  также изменится и появляется ЭДС в замкнутой цепи.

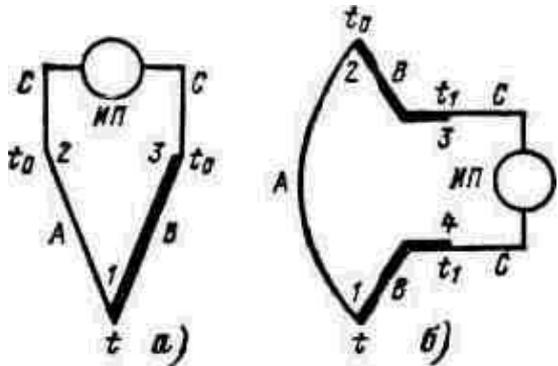
# Объяснение эффекта Зеебека

## □ 3. Фононное увлечение

Если в твёрдом теле существует градиент температуры, то число фононов, движущихся от горячего конца к холодному, будет больше, чем в обратном направлении. В результате столкновений с электронами фононы могут увлекать за собой последние и на холодном конце образца будет накапливаться отрицательный заряд (на горячем — положительный) до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не уравновесит эффект увлечения.

Эта разность потенциалов и представляет собой 3-ю составляющую термоэдс, которая при низких температурах может быть в десятки и сотни раз больше рассмотренных выше. В магнетиках наблюдается дополнительная составляющая термоэдс, обусловленная эффектом увлечения электронов магнонами

# Схемы включения измерительного прибора в цепи термопар



Схемы включения измерительного прибора в цепь термоэлектрического термометра

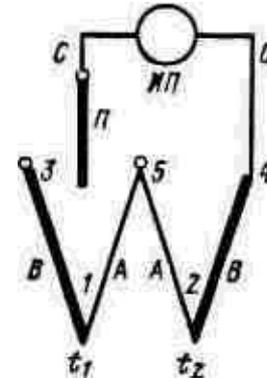


Схема включения измерительного прибора в цепь дифференциального термоэлектрического термометра

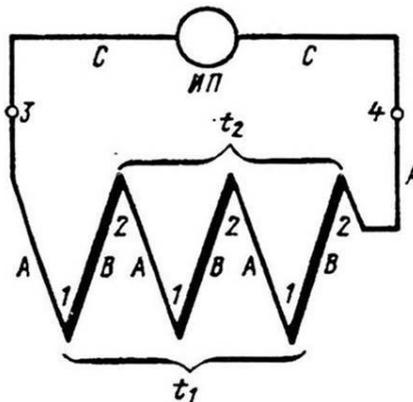


Схема включения измерительного прибора в цепь дифференциальной термобатареи

# ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

- $t \neq t_0$       $E_{ab}(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0)$

- включение в цепь третьего проводника

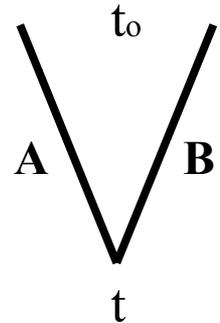
- $t = \text{Const}$       $E_{abc}(t) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t) + e_{ca}(t) = 0$

$$e_{ab}(t) = -e_{bc}(t) - e_{ca}(t)$$

- $t \neq t_0$       $E_{abc}(t, t_0) = e_{ab}(t) + e_{bc}(t_0) + e_{ca}(t_0) = 0$

$$e_{bc}(t_0) + e_{ca}(t_0) = -e_{ab}(t_0)$$

$$E_{abc}(t, t_0) = e_{ab}(t) - e_{ab}(t_0)$$



# Материалы для изготовления термопар

## Требования к материалам, используемым для изготовления термоэлектрических термометров

- - Жаростойкость
- - Жаропрочность
- - химическая стойкость
- - Воспроизводимость и стабильность градуировочной характеристики
- - Линейность градуировочной характеристики
- - Воспроизводимость в необходимых количествах материалов, обладающих вполне определёнными термоэлектрическими свойствами.

# Типы термопар

- платинородий- платиновые ТПП13 Тип R
- платинородий- платиновые ТПП10 Тип S
- платинородий- платинородий ТПР Тип В
- железо-константановые (железо-медьникелевые) ТЖК Тип J
- медь-константановые (медь-медьникелевые) ТМКн Тип Т
- хромель-алюмелевые ТХА Тип К
- хромель-константановые ТХКн Тип Е
- хромель-копелевые ТХК Тип L
- медь – копелевые ТМК Тип М

# Термо-ЭДС термопар при $t = 100^{\circ}\text{C}$ , мВ

платинородий- платиновые	0,64
платинородий- платиновые	0,64
железо- копелевые	5,57
медь-константановые	4,10
хромель-алюмелевые	4,10
хромель-копелевые	6,95
медь – копелевые	4,76

# Методы измерения термо-ЭДС

- ❑ Прямые измерения термо-ЭДС милливольтметром
- ❑ Компенсационный метод измерения термо-ЭДС
- ❑ Компенсационный метод измерения основан на уравнивании измеряемой ЭДС известным падением напряжения. При этом ток в цепи источника термо-ЭДС отсутствует и результаты измерения не зависят от сопротивления цепи термоэлектрического термометра

# ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

- ❑ - погрешности показаний при нормальных условиях работы (погрешности градуировки, вариации показаний вследствие гистерезиса)
- ❑ - погрешности, являющиеся следствием отклонения условий измерения от нормальных (действие внешних магнитных полей или ферромагнитных масс, наклон измерительного прибора, отклонение температуры прибора от нормальной, отклонение сопротивления внешней цепи от стандартного значения, неравенство температур в местах соединения термоэлектродов термопары с компенсационными проводами и в местах соединения компенсационных проводов с измерительным прибором, отклонение температуры свободного конца термопары от 0°C, отклонение температуры рабочего конца термопары от температуры измеряемой среды, являющееся следствием условий теплообмена)
- ❑ - погрешности отсчета показаний
- ❑ - тепловая инерционность термометров

# ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

- ❑ действие ТС основано на свойстве вещества изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры
- ❑ материал для изготовления - металлы и полупроводники
- ❑ Электрическое сопротивление металла увеличивается с повышением температуры в связи с возрастающим рассеянием электронов на неоднородностях кристаллической решетки, обусловленным увеличением тепловых колебаний ионов около своих положений равновесия ( $\alpha = 0,0035 - 0,0065 \text{ K}^{-1}$ ). Интервал измерения температур от  $-260$  до  $750^\circ\text{C}$ .
- ❑ В полупроводниках число электронов проводимости резко возрастает с увеличением температуры и электрическое сопротивление уменьшается при их нагревании ( $\alpha = 0,01 - 0,15 \text{ K}^{-1}$ ). Интервал измерения температур от  $1,3$  до  $400 \text{ K}$ .

# Требованиям к материалам для изготовления ТС

- ❑ **стабильность и воспроизводимость** градуировочной характеристики в интервале рабочих температур
- ❑ **монотонная** зависимость сопротивления от температуры
- ❑ высокая **чувствительность**, простота градуировочной характеристики, большое **удельное сопротивление**, противостояние окислению и др.
- ❑ высокая **чистота**
- ❑ достаточно высокое значение **температурного коэффициента сопротивления**

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}$$

$$\alpha =$$

$$\frac{R_{100} - R_0}{100}$$

- медь, платина и никель
- полупроводниковые материалы: германий, окислы меди, марганца, кобальта, магния, титана и их смеси

# Свойства материалов для изготовления ТС

□ Медь (не выше 200°C)

$$\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K} \quad \rho = 0,17 \times 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad R_{100}/R_0 = 1,428$$

□ Никель (интервал температур от -60 до +180°C)

$$\alpha = 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K} \quad \rho = 1,28 \times 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad R_{100}/R_0 = 1,617$$

□ Платина (интервал температур от -260 до +1100°C)

$$R_{100}/R_0 = 1,391$$

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad \text{от } 0 \text{ до } 630^\circ\text{C}$$

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^3(t-100)) \quad \text{от } -183 \text{ до } 0^\circ\text{C}$$

# Устройство термометров сопротивления

## Материал для изготовления каркаса

- о электроизоляционные свойства
- о большая теплопроводность
- о механическая прочность
- о не реагировать с металлом ТС
- о коэфф. линейного расширения  $\Delta k \sim \Delta m$

*слюда*

*плавленый кварц*

*керамика*

*стекло*

*пластмассы*

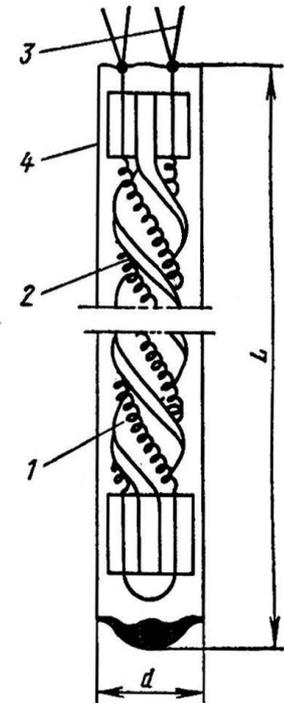


Схема платинового ТС  
1-каркас; 2-платиновая  
спираль;  
3-выводы; 4-оболочка.

# Компенсационный метод измерения сопротивления термометра

*исключено влияние сопротивления соединительных проводников на результаты измерения*

$$U_N = IR_N \quad U_T = IR_T$$

$$R_T = R_N U_T / U_N$$

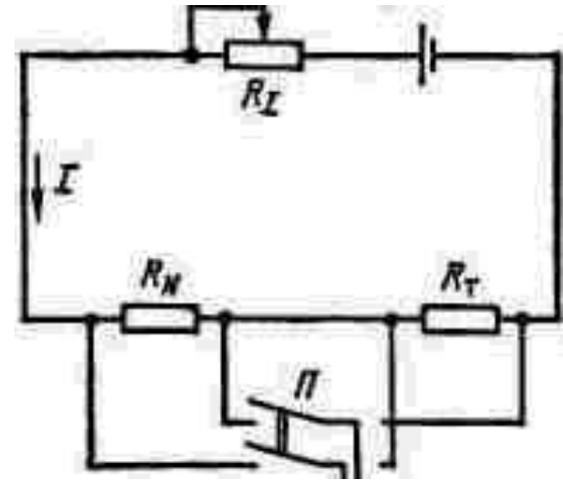


Схема измерения сопротивления термометра компенсационным методом

# Измерение сопротивления термометра уравновешенным мостом

В одну из диагоналей (b, d) - источник питания.  
Во вторую (a, c) — нульгальванометр

*При равновесии моста ( $I_r = 0$ )*

$$I_T = I_1 \quad I_2 = I_3$$

$$I_T R_T = I_2 R_2 \quad I_1 R_1 = I_3 R_3$$

$$\frac{R_T}{R_1} = \frac{R_2}{R_3} \quad R_T = \frac{R_2}{R_3} R_1$$

уравновесить мост можно подбором  
сопротивления  $R_1$  при постоянном  
отношении балансных плеч  $R_2/R_3$

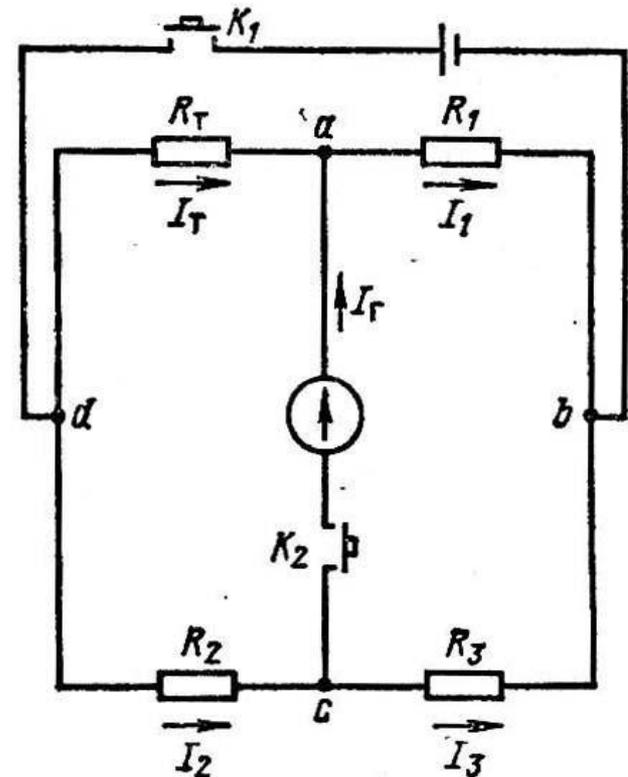


Схема уравновешенного  
моста

# ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

- ❑ **погрешности, зависящие от термометра и соединительной линии** (отклонение градуировки от стандартной, погрешность индивидуальной градуировки, неточность подгонки сопротивления линии, изменение сопротивления линии при колебании температуры окружающей среды)
- ❑ **погрешности, зависящие от вторичного прибора** (основная и дополнительная погрешности, механическая инерция прибора)
- ❑ **погрешности, связанные с условиями применения термометра** (неблагоприятные условия теплообмена между термометром и окружающей средой, перегрев чувствительного элемента измерительным током, тепловая инерционность термометра)

# ПИРОМЕТРЫ

*Действие основано на измерении мощности теплового излучения объекта преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света*

## ❑ 1. Спектральный диапазон

- **Яркостные** (сравнение цвета нагретого тела с цветом эталонной нити)
- **Радиационные** (по показателю мощности теплового излучения)
- **Цветовые** (мультиспектральные, спектрального отношения) — по сравнению теплового излучения в различных спектрах

## ❑ 2. Температурный диапазон

- Низкотемпературные и высокотемпературные

## ❑ 3. Визуализация величин

- Текстово-цифровой и графический методы

# ПИРОМЕТРЫ



Переносной пирометр  
инфракрасного излучения



Оптический пирометр



Стационарный пирометр  
инфракрасного излучения

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ

## Закон Планка

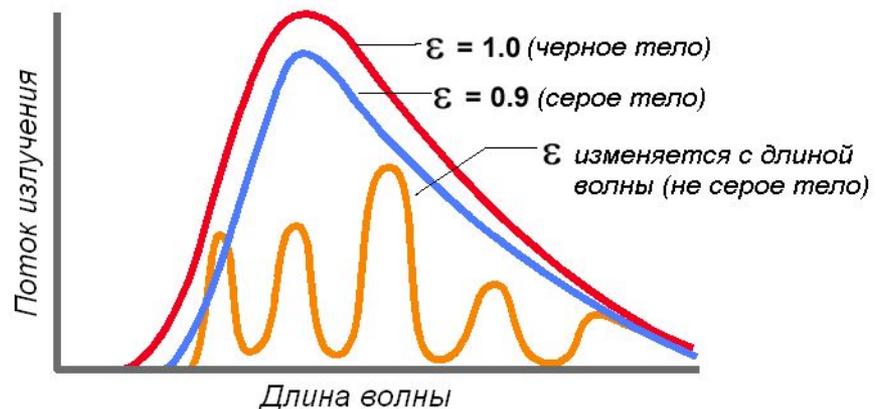
$$E(\lambda, T) = \frac{\varepsilon \times C_1}{\lambda^5 \times \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \times T}} - 1 \right)}$$

$\varepsilon$  - излучательная способность,  $C_1$  и  $C_2$  – первая и вторая постоянные Планка,  $\lambda$  - длина волны,  $T$  – температура

## Закон Стефана-Больцмана

$$E_{\dot{0}} = \sigma T^4$$

- $\varepsilon = 1$  – АЧТ
- Реальные объекты -  $\varepsilon = f(\lambda, T)$ , а также от многих других факторов – материала и формы объекта, состояния поверхности, наличия оксидной пленки, конденсата влаги и т. п
- $\varepsilon = 0,1$  - поверхность расплавленного металла .  $\varepsilon = 0.9-0.95$  - плавающий на поверхности шлак



# Схема квазимонохроматического пирометра

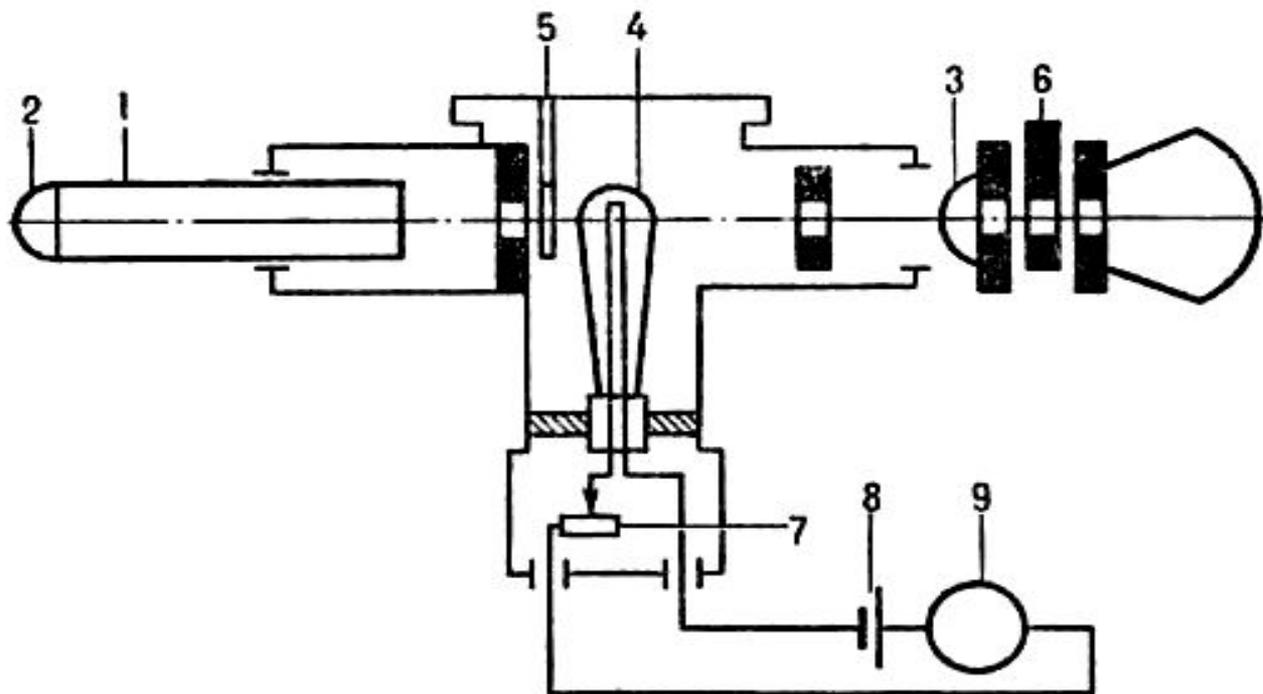


Рис. 1. Квазимонохроматич. пирометр: 1 – трубка; 2, 3 – линзы; 4 – лампа нака-  
ливания; 5, 6 – серый и красный светофильтры; 7 – реостат; 8 – аккумулятор;  
9 – милливольтметр.

# Схема фотоэлектрического пирометра

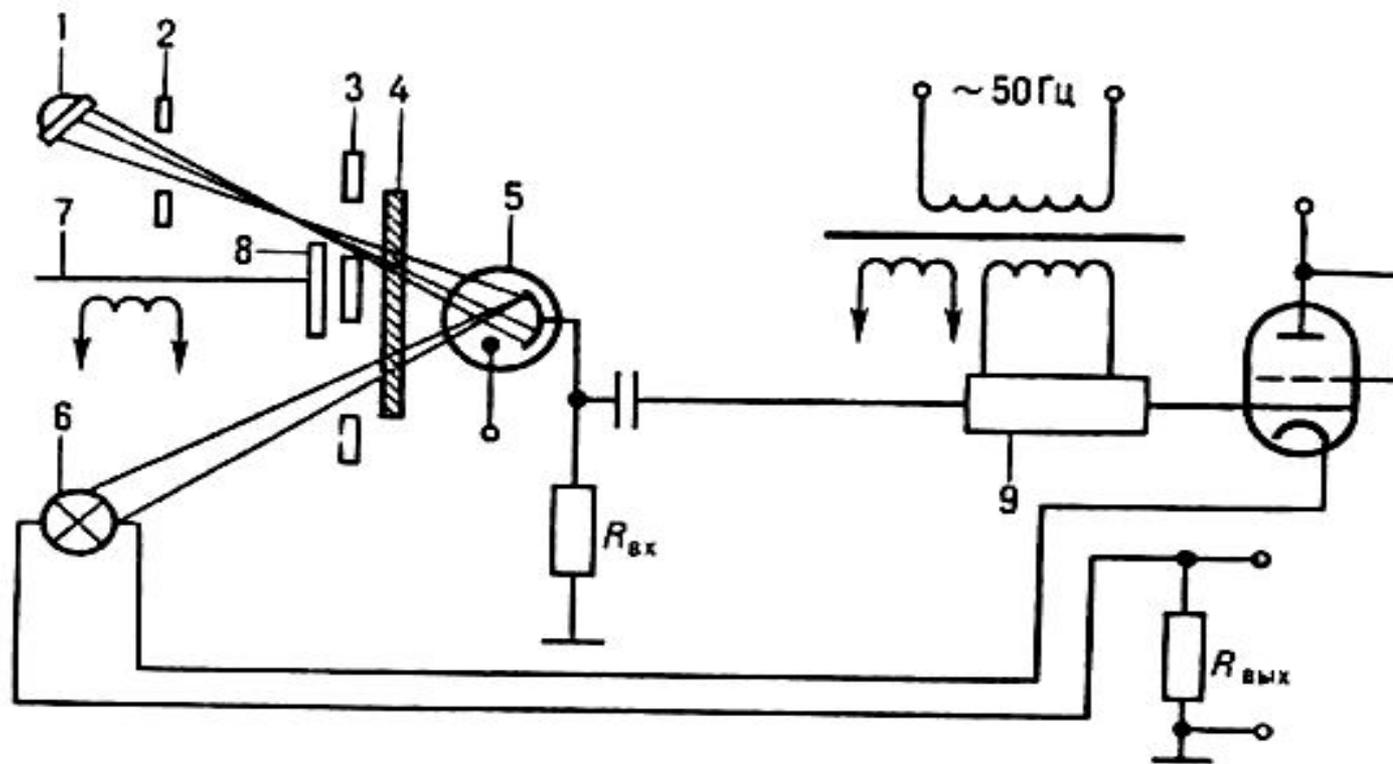


Рис. 2. Фотоэлектрич. пирометр: 1 – объектив; 2, 3 – диафрагмы; 4 – светофильтр; 5 – фотоэлемент; 6 – лампа; 7 – модулятор света; 8 – заслонка; 9 – усилитель;  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$  – входное и выходное сопротивления в цепи лампы.

## Пирометр спектрального отношения

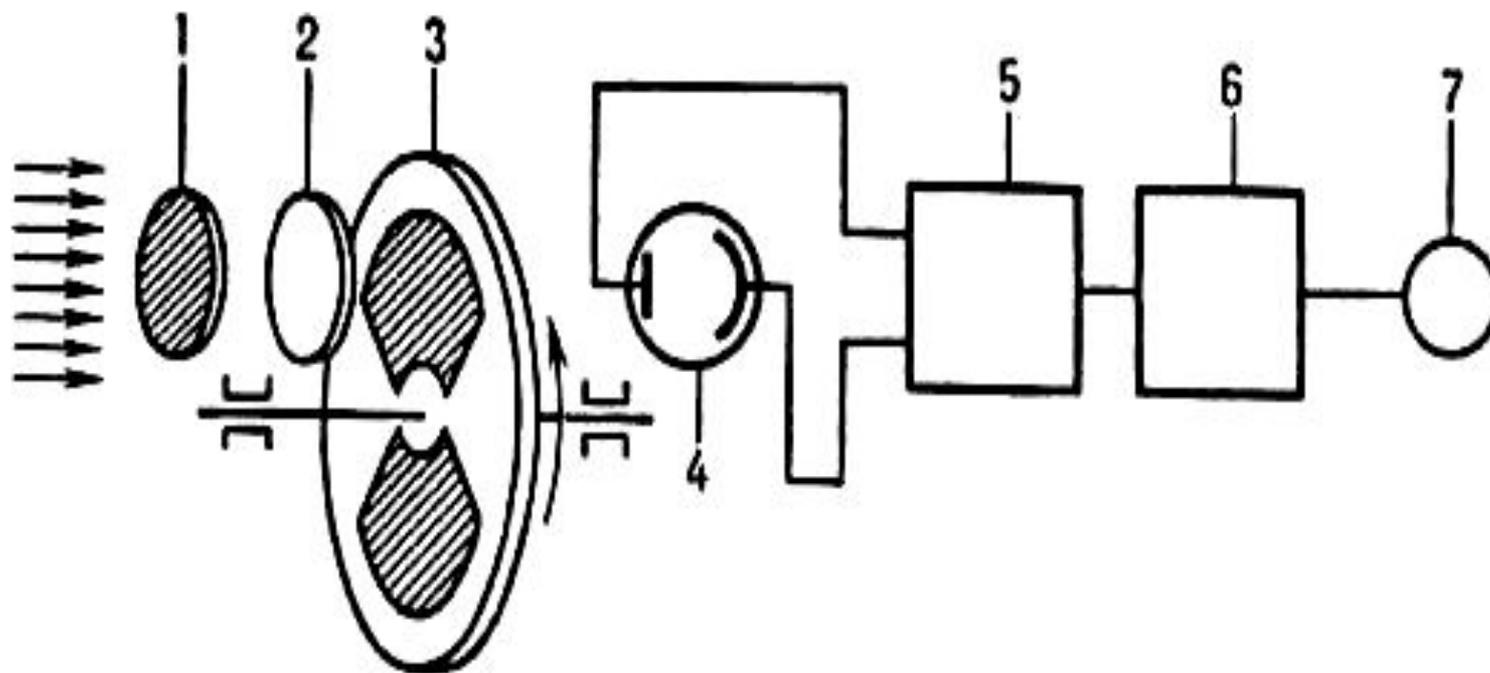


Рис. 3. Пирометр спектрального отношения: 1 – защитное стекло; 2 – объектив; 3 – обтюратор с красным и синим светофильтрами; 4 – фотоэлемент; 5 – усилитель; 6 – логарифмич. устройство; 7 – милливольтметр.

# Пирометр полного излучения

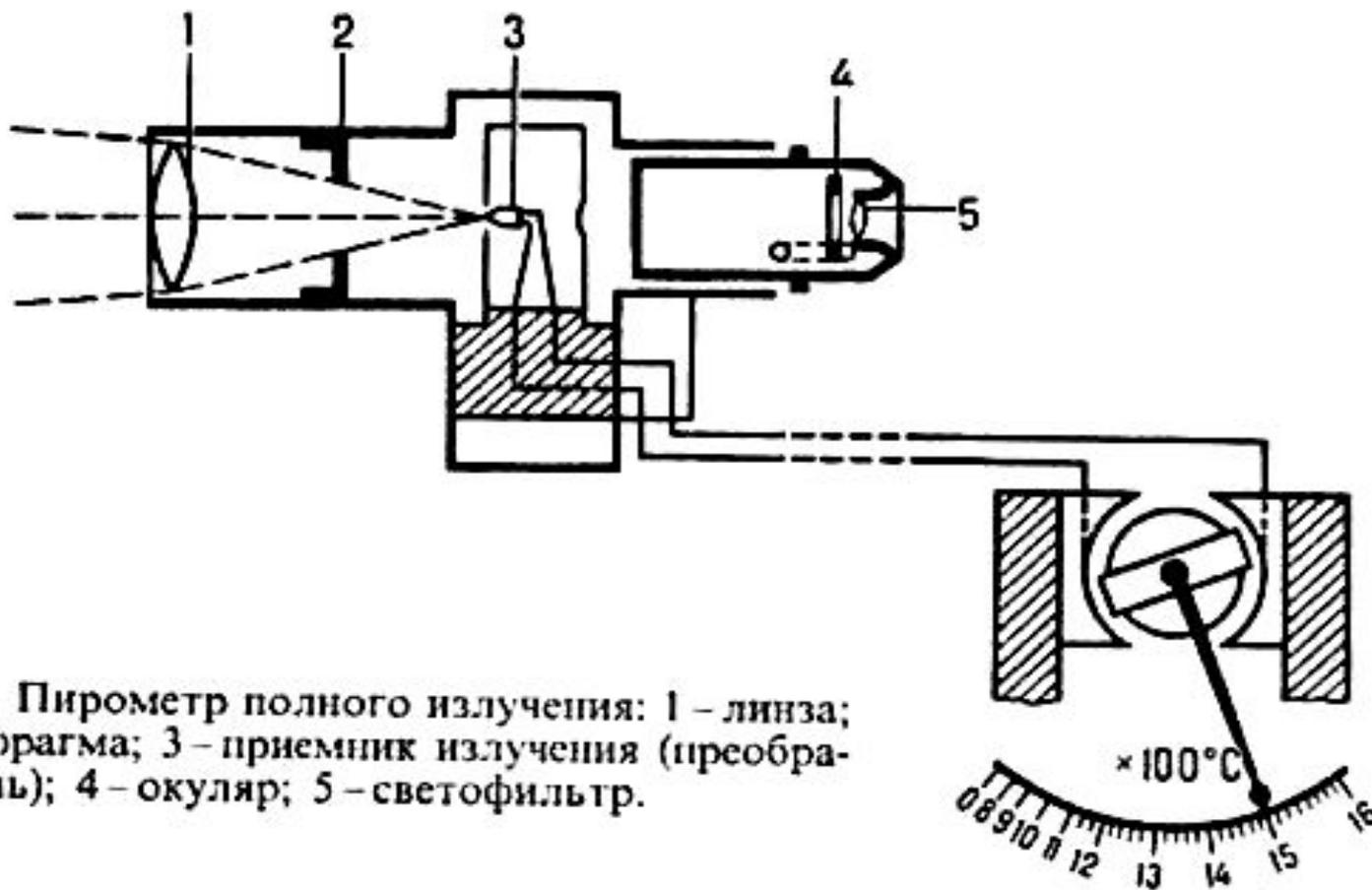


Рис. 4. Пирометр полного излучения: 1 – линза; 2 – диафрагма; 3 – приемник излучения (преобразователь); 4 – окуляр; 5 – светофильтр.

# Основные преимущества и недостатки пирометрического метода измерений

## Преимущества

- - **быстродействие**. При использовании квантовых приемников излучения и быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей постоянная времени может составлять  $10^{-2} - 10^{-6}$  с
- - возможность **измерения температуры движущихся объектов** и элементов оборудования, находящихся под **высоковольтным потенциалом**
- - отсутствие **искажения температурного** поля объекта контроля
- - возможностью измерения **высоких температур**
- - возможностью работы в условиях **повышенной радиации и температуры** окружающей среды

## Недостатки

- трудности **полного учета связей между термодинамической температурой объекта и регистрируемой пирометром тепловой радиацией**. Необходимо учитывать изменение излучательной способности поверхности  $\epsilon$  от длины волны  $\lambda$  в регистрируемом спектральном диапазоне и от температуры  $T$  в диапазоне измерений, наличие поглощения излучения в среде между пирометром и объектом контроля, геометрические параметры поля зрения пирометра и его оптической системы, температуру окружающей среды и корпуса прибора.

# Давление и единицы измерения

- **Давлѐние** ( $P$ ) — **физическая величина**, характеризующая состояние сплошной среды и численно равная **силе**, действующей на единицу площади поверхности **перпендикулярно** этой поверхности. В данной точке давление определяется как отношение нормальной составляющей **силы**, действующей на малый элемент поверхности, к его **площади**

$$P = \frac{dF_n}{dS}.$$

- **Среднее давление** по всей поверхности - отношение силы к площади поверхности

$$P_{\text{ср}} = \frac{F_n}{S}.$$

- **Давление** является интенсивной физической величиной. **Давление** в системе **СИ** измеряется в **паскалях**

# Единицы измерения давления

	Паскаль (Pa, Па)	Бар (bar, бар)	Техническая атмосфера (at, ат)	Физическая атмосфера (atm, атм)	Милл. рт. столба (мм рт.ст., mmHg, torr, торр)	М вод столба (м вод. ст., m H <sub>2</sub> O)	Фунт-сила на кв. дюйм (psi)
1 Па	1 Н/м <sup>2</sup>	10 <sup>-5</sup>	10,197×10 <sup>-6</sup>	9,8692×10 <sup>-6</sup>	7,5006×10 <sup>-3</sup>	1,0197×10 <sup>-4</sup>	145,0×10 <sup>-6</sup>
1 бар	10 <sup>5</sup>	1 ×10 <sup>6</sup> дин/см <sup>2</sup>	1,0197	0,98692	750,06	10,197	14,504
1 ат	98066,5	0,980665	1 кгс/см <sup>2</sup>	0,96784	735,56	10	14,223
1 атм	101325	1,01325	1,033	1 атм	760	10,33	14,696
1 мм рт.ст.	133,322	1,3332×10 <sup>-3</sup>	1,3595×10 <sup>-3</sup>	1,3158×10 <sup>-3</sup>	1 мм рт.ст.	13,595×10 <sup>-3</sup>	19,34×10 <sup>-3</sup>
1 м вод. ст.	9806,65	9,80665×10 <sup>-2</sup>	0,1	0,096784	73,556	1 м вод. ст.	1,4223
1 psi	6894,76	68,948×10 <sup>-3</sup>	70,307×10 <sup>-3</sup>	68,046×10 <sup>-3</sup>	51,715	0,70307	1 lbf/in <sup>2</sup>

# Классификация манометров

- **Абсолютное, избыточное и вакуумметрическое** давления

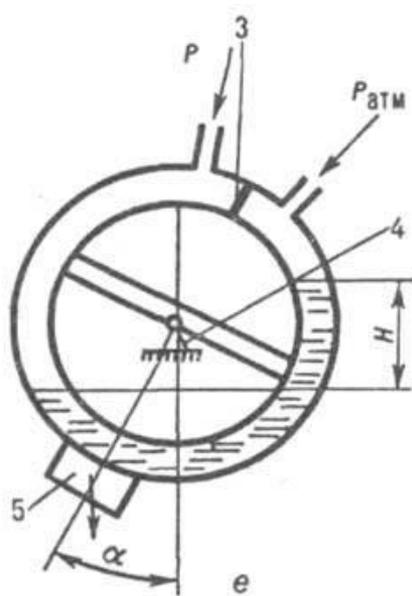
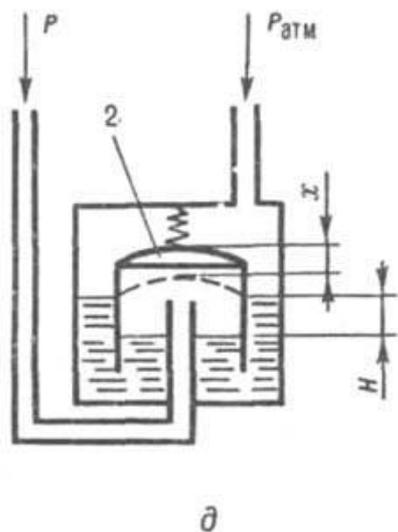
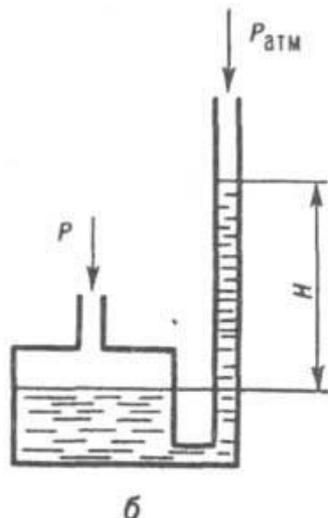
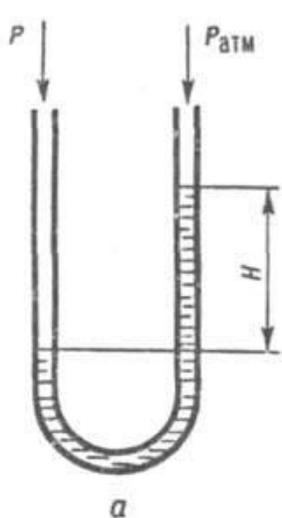
$$p_a = p + p_{am}$$

- **Вакуумметрическое** давления - давления ниже атмосферного

$$p_v = p_{am} - p_a$$

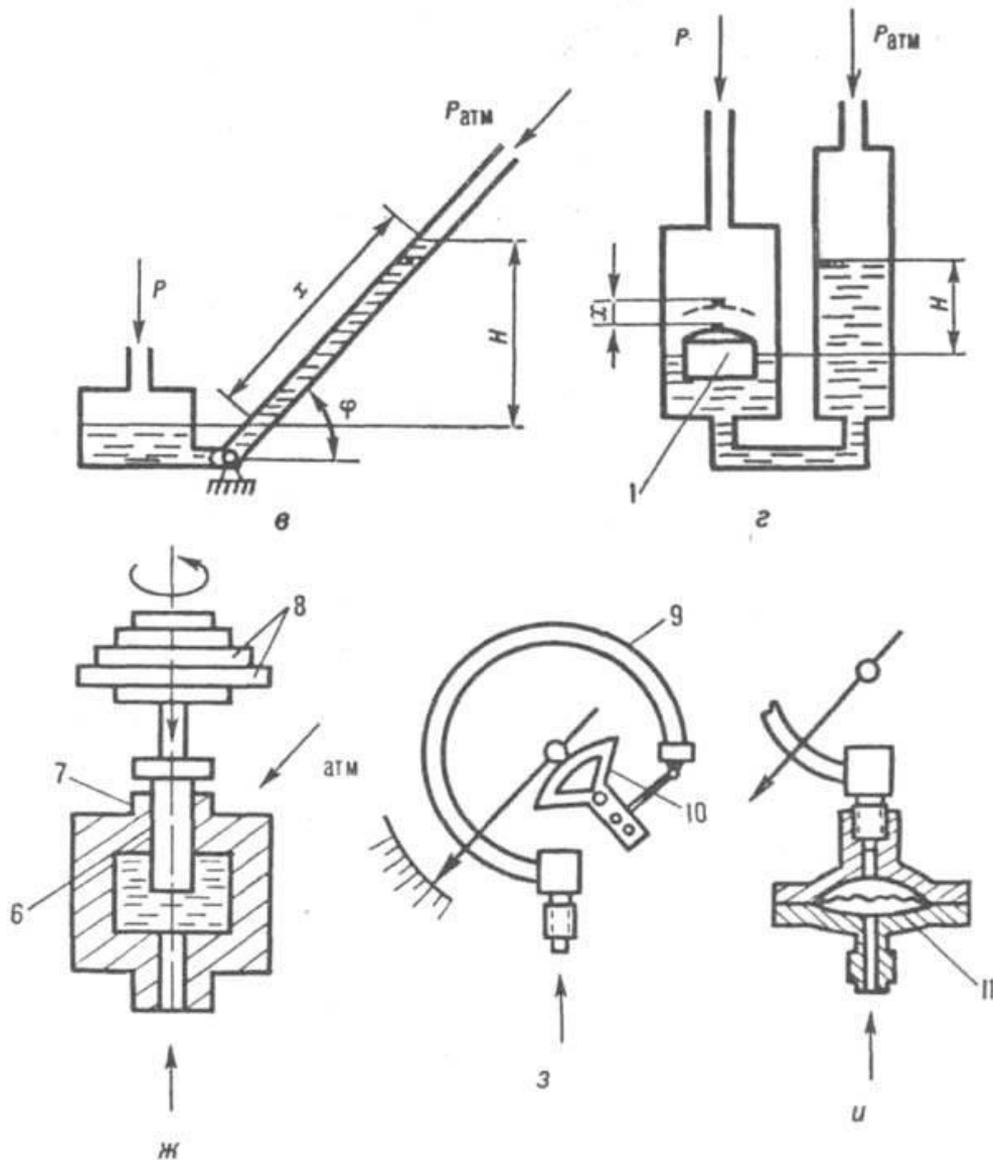
- Средства измерения, предназначенные для измерения давления и разности давлений, называются **манометрами**
- **Барометры, манометры избыточного давления, вакуумметры, манометры абсолютного давления, дифференциальные манометры**
- В зависимости от принципа действия манометры разделяются на **жидкостные, деформационные, грузопоршневые, электрические, ионизационные и тепловые**

# Жидкостные манометры



- а - U-образный
- б - чашечный с постоянным углом наклона трубки
- д – колокольный
- е - кольцевой

# Жидкостные манометры



- **в** - чашечный с переменным углом наклона трубки
- **г** – поплавковый
- **ж** – грузопоршневый
- **з** - с трубчатой пружиной
- **и** - мембранный разделитель давлений с закрытой камерой

# Жидкостные манометры и дифманометры

- ❑ *Измеряемое давление (разность давлений) уравнивается давлением столба манометрической жидкости.* Диапазон измерения -  $10^{-10}$  -  $10^5$  Па.
- ❑ *Погрешность измерения U-образных и чашечных манометров - 0,5-1,0%.*
- ❑ *Двухчашечные (компенсационные) микроманометры: погрешность 0,02-0,05%.*
- ❑ *Заполняют водой, спиртом, толуолом, силиконовым маслом, ртутью.*
- ❑ *В поплавковых, колокольных и кольцевых дифманометрах мера измеряемого давления (перепада) - положение подвижного элемента прибора. Пределы измерения - от  $4 \cdot 10^3$  Па до 0,16 МПа. Погрешность - 2,5%. Колокольные дифманометры - для измерения малых давлений и перепадов давлений (от 25 до 400 Па).*
- ❑ *В кольцевых дифманометрах замкнутый сосуд с непроницаемой перегородкой – на опоре, которая расположена в центре тяжести сосуда. Мера измеряемой разности давлений - угол поворота кольца. Основные достоинства кольцевых манометры: высокая чувствительность, независимость угла поворота от плотности манометрической жидкости, независимость показаний от температуры окружающего воздуха.*

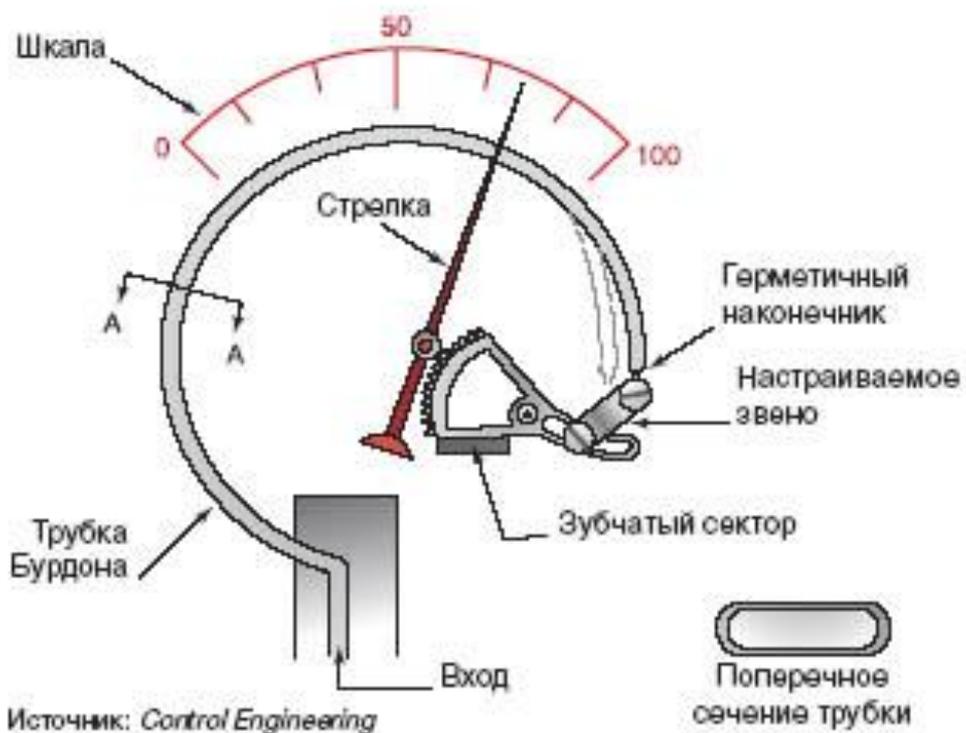
# Деформационные манометры

- ❑ Давление (разность давлений) определяется по деформации упругих чувствительных элементов: трубчатых манометрических пружин, плоских и гофрированных мембран, мембранных коробок, сильфонов, цилиндрических трубок и др. Пределы измерения от 10 до  $2,5 \cdot 10^9$  Па.
- ❑ Наиболее распространены - пружинные манометры с одновитковым трубчатым чувствительным элементом. Под действием давления деформируется сечение пружины и происходит перемещение стрелки, которая показывает давление. Диапазон - до 2500 МПа, погрешность 0,16-4,0%.
- ❑ Для измерения небольших давлений (разрежений) и разности давлений применяют манометры с чувствительными элементами в виде сильфонов, гофрированных мембран и мембранных коробок. Погрешность 0,5-2,5%.
- ❑ Мембранные разделители давления.

# Трубчато-пружинный показывающий манометр



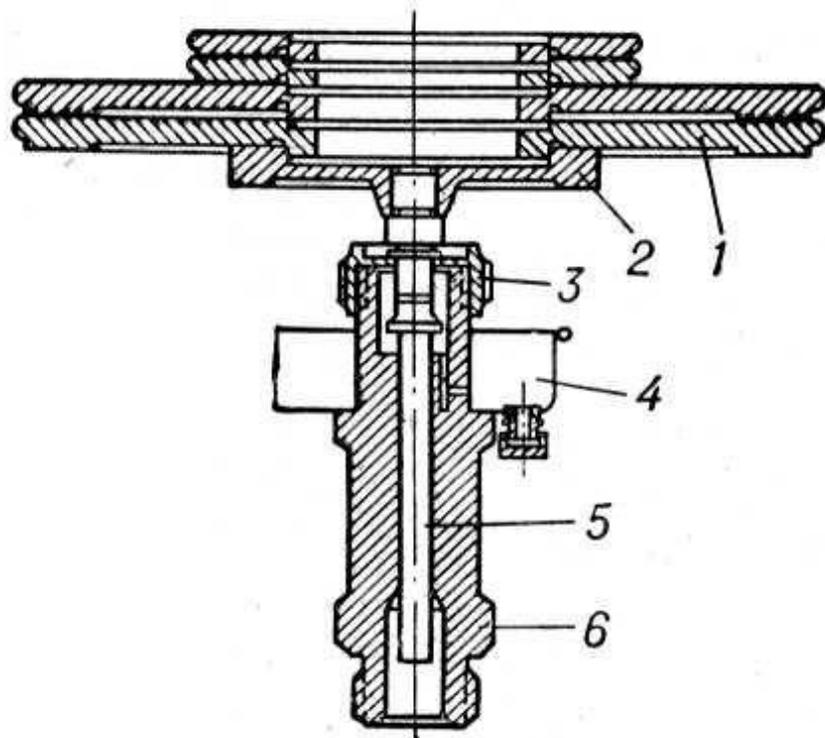
Традиционная конструкция механического манометра



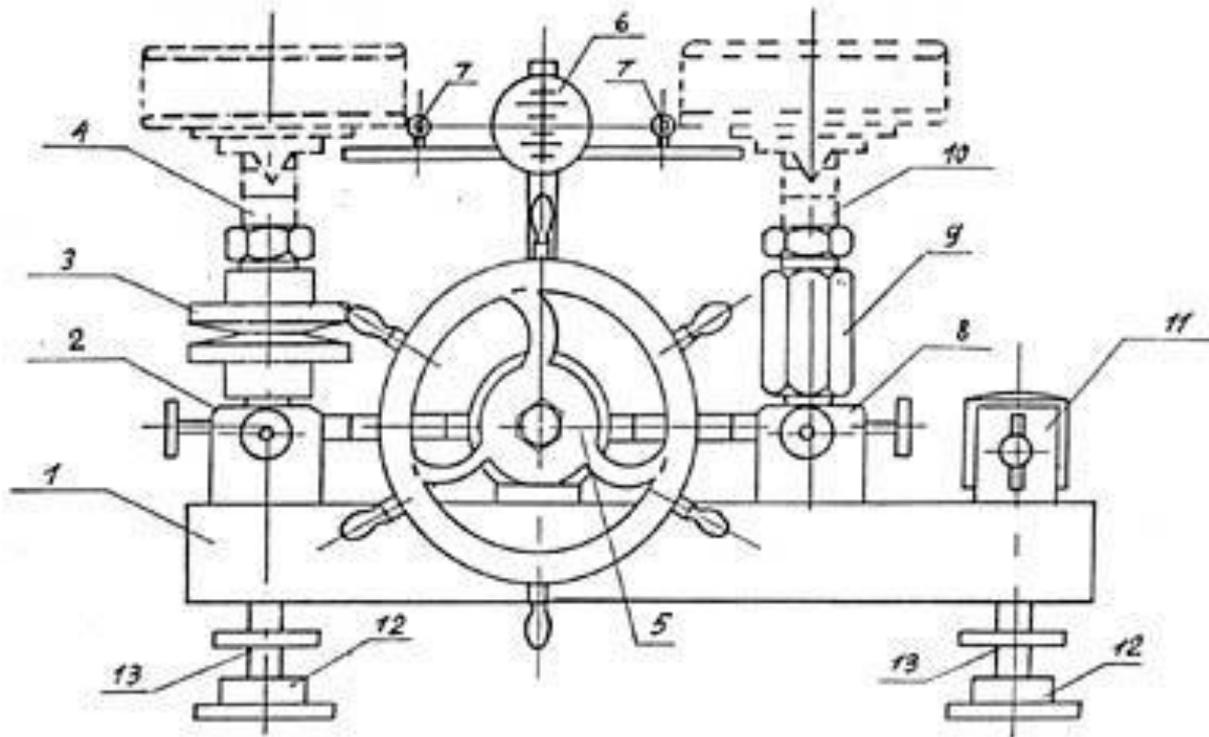
# Грузопоршневые манометры

- *Измеряемое давление, действующее через манометрическую жидкость на поршень манометра, уравнивается весом поршня и набора калиброванных грузов.* Наиболее распространены манометры с неуплотненным поршнем, между поршнем и цилиндром имеется небольшой зазор. Пространство под поршнем заполнено специальным маслом, которое под давлением поступает в зазор и обеспечивает смазку трущихся поверхностей. Изменяя вес грузов и площадь сечения поршня, можно изменять пределы измерения манометры в широком диапазоне (от 2500 Па до 2500 МПа).
- *Грузопоршневые манометры* отличаются высокой точностью и стабильностью показаний; погрешность от 0,02 до 0,2% от верхнего предела измерения.
- *Грузопоршневые манометры* используют, как правило, для проверки манометров других типов и при лабораторных измерениях.

# Грузопоршневые манометры



# Грузопоршневые манометры



# Датчики давления, основанные на других принципах

- **Тензометрические датчики.** Представляют собой мембраны, на которых размещены проволочные, фольговые или полупроводниковые резисторы, сопротивление которых меняется при деформации мембраны под действием давления.
- **Пьезоэлектрические датчики.** Действие основано на пьезоэлектрическом эффекте (возникновении электрических зарядов на поверхности кварцевой пластины).
- **Электрорезисторные датчики.** Под действием давления изменяется электрическое сопротивление тонкой проволоки (для измерения давления свыше 100 МПа).
- **Индуктивные датчики.** Действие основано на изменении индуктивности системы при перемещении чувствительного элемента.
- **Емкостные датчики.** Действие основано на преобразовании перемещения чувствительного элемента в изменение емкости конденсатора.
- **Электронные и ионные датчики.** Действие основано на изменении характеристик соответствующих электронных и ионных ламп при взаимном перемещении их электродов, один из которых связан с чувствительным элементом датчика.
- **Магнитоупругие датчики.** Действие обусловлено свойством ферромагнитных материалов изменять магнитную проницаемость под действием давления.
- **Радиационные датчики.** Действие датчиков основано на зависимости от давления интенсивности потока, поступающего от источника излучения к приемнику.

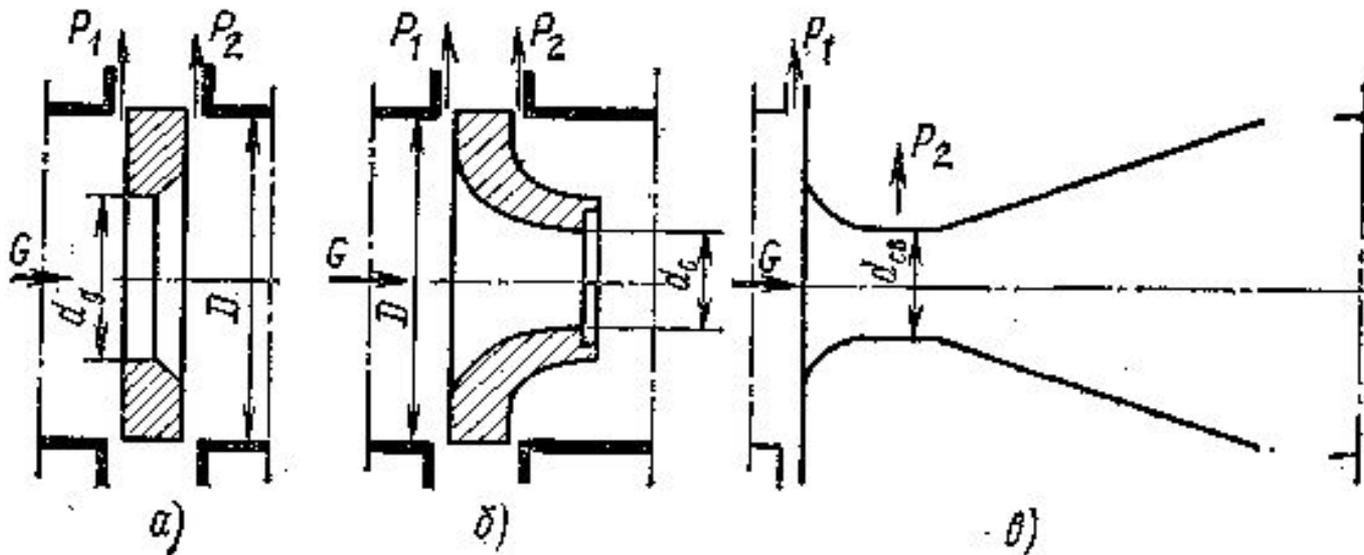
# Измерение расхода

- ❑ **Прибор, измеряющий расход**, т. е. количество вещества, проходящее в трубопроводах в единицу времени – **расходомер**.  
Объемный ( $m^3/ч$ ,  $m^3/с$ ) и массовый расход вещества ( $кг/ч$ ,  $кг/с$ ,  $т/ч$ )
- ❑ **Расходомер со счетчиком** для одновременного измерения расхода и количества вещества - **счетчик количества** Показания счетчика - в единицах объема ( $m^3$ , л) или в единицах массы ( $кг$ , т)

## **Типы расходомеров:**

- **переменного перепада давления** с сужающими устройствами
- **постоянного перепада давления**
- **тахометрические**
- **электромагнитные**
- **ультразвуковые.**

# Сужающие устройства



**Диафрагма** (а) - тонкий диск с центральным отверстием, передняя часть которого имеет цилиндрическую форму, переходящую в расширяющийся конус

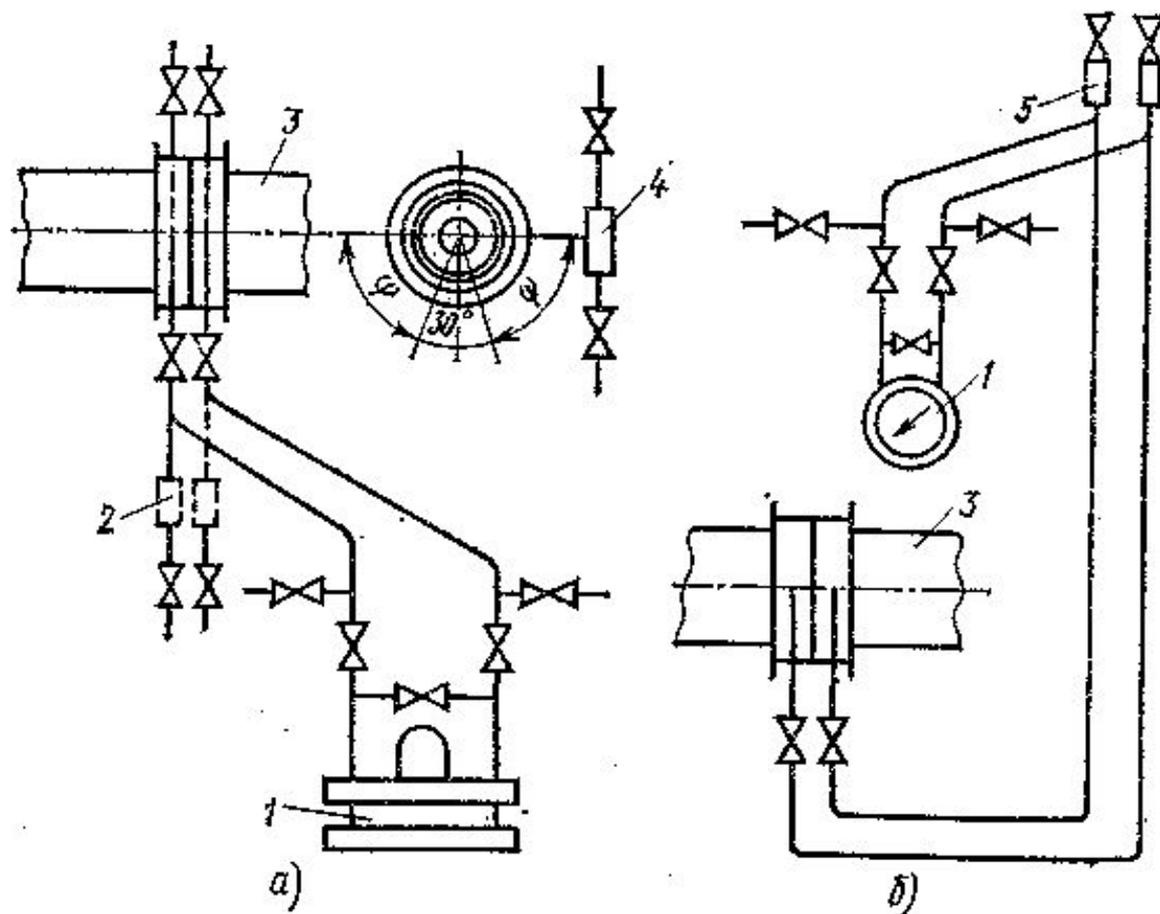
**Сопло** (б) имеет профилированную входную часть, которая переходит в цилиндрический участок. Сопла позволяют измерять больший расход, чем диафрагма. Потери давления и ошибки измерения ниже, чем у диафрагмы

**Сопло Вентури** (в) - там, где недопустимы большие потери давления. Оно состоит из двух частей: стандартного сопла и диффузора

# Требования к установке сужающих устройств

- ❑ фазовое состояние вещества при прохождении через сужающее устройство *не должно меняться*
- ❑ участки трубопровода до и после сужающего устройства должны быть *прямыми без запорной арматуры*
- ❑ при измерении расхода агрессивных веществ дифманометры надо устанавливать со специальными *разделительными сосудами*
- ❑ длина и диаметр импульсных линий от сужающих устройств к дифманометрам *нормированы*
- ❑ импульсные линии прокладывают *вертикально или с небольшим уклоном*
- ❑ на импульсных линиях вблизи дифманометра устанавливают *вентили* для продувки линий

# Схемы подсоединений импульсных линий при измерении расхода жидкости



**а** - дифманометр ниже сужающего устройства

**б** - дифманометр выше сужающего устройства

- 1-дифманометр
- 2-вентили продувки
- 3-сужающее устройство
- 4-уровнительные сосуды
- 5-газосборники

# Зависимость между расходом и перепадом давления

- При определении *зависимости между расходом и перепадом давления* используются:
- *Закон сохранения энергии - в виде уравнения Бернулли*
- *Уравнения неразрывности струи*  
(предположения: жидкость несжимаема, отсутствует теплообмен с окружающей средой, трубопровод горизонтален)
- $Q_m = K_m \sqrt{\Delta p}$
- $Q_o = K_o \sqrt{\Delta p}$

# Достоинства и недостатки расходомеров с сужающими устройствами

## Достоинства

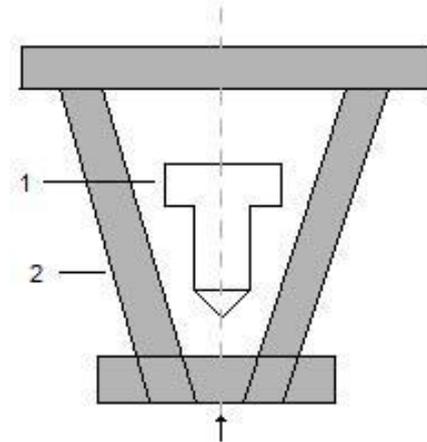
- ❑ простые, дешевые и надежные средства измерения расхода
- ❑ универсальны (могут применяться для измерения расхода любых однофазных сред в широком диапазоне параметров)
- ❑ градуировочная характеристика сужающих устройств может быть определена расчетным путем
- ❑ возможность использования для различных условий измерения

## Недостатки

- ❑ нелинейная зависимость между расходом и перепадом
- ❑ необходимость индивидуальной градуировки сужающих устройств при измерении расходов при малых числах  $Re$  и в трубах малого диаметра
- ❑ имеют ограниченную точность (погрешность измерения до 3%)
- ❑ инерционность из-за наличия длинных импульсных трубок

# Расходомеры постоянного перепада давления. Ротаметры

- Используются для измерения **небольших объемных расходов жидкостей** (до 16 м<sup>3</sup>/ч) и газов (до 40 м<sup>3</sup>/ч) в вертикальных трубопроводах (диаметром от 4 до 100 мм)
- Действия ротаметров **основано на обтекании измеряемым потоком вещества чувствительного элемента** так, что перепад давления на нем сохраняется **постоянным**
- Перепад давления на чувствительном элементе является постоянным и **не зависит от расхода среды**



$$(p_1 - p_2) F = m$$

# Тахометрические расходомеры

- Скорость движения рабочего тела пропорциональна объемному расходу.
- Рабочее тело – преобразователь расхода (турбинка, шарик и т. п.) – под воздействием потока вращается.

- **Тахометрические расходомеры:**

- Турбинные*

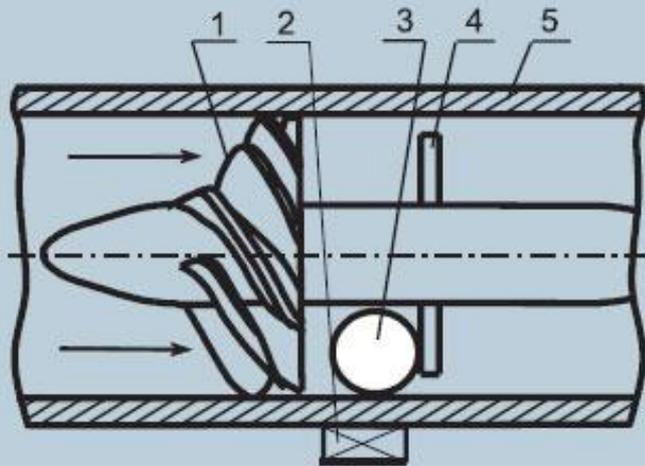
- Шариковые*

- Камерные*

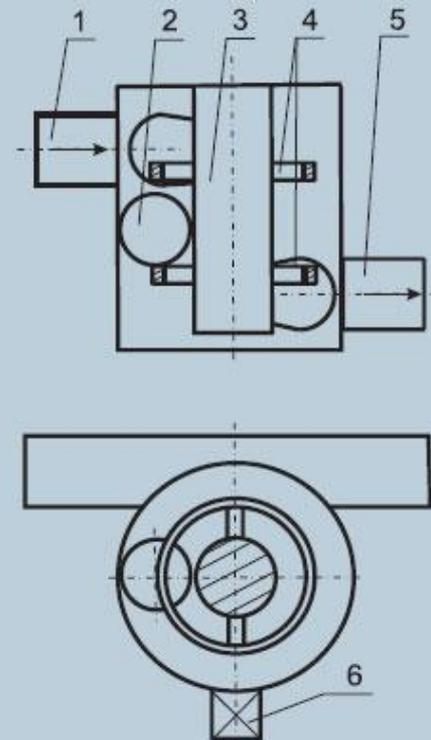
- В турбинных и шариковых расходомерах - магнитоэлектрические и дифференциально-трансформаторные передающие преобразователи

# Тахометрические расходомеры

## Шариковые расходомеры



**Рис.1. Шариковый расходомер с осевым подводом потока:**  
1 — струенаправляющий аппарат; 2 — устройство для съема сигнала;  
3 — шарик; 4 — ограничительное кольцо; 5 — корпус.



**Рис. 2. Шариковый расходомер с тангенциальным подводом жидкости:**  
1, 5 — тангенциальные патрубки; 2 — шарик; 3 — ступица; 4 —  
ограничительные кольца; 6 — устройство для бесконтактного съема сигнала.

# Тахометрические расходомеры

## Шариковые расходомеры

- **Шариковыми** называются **тахометрические расходомеры**, подвижным элементом которых является **шарик**, непрерывно движущийся в одной плоскости по внутренней поверхности трубы под воздействием предварительно закрученного потока. Скорость движения шарика по окружности трубы пропорциональна объемному расходу жидкости

$$f = v_{ш} / (2\pi r)$$

$f$  – частота импульсов тахометрического преобразователя,  $v$  – скорость шара,  $r$  – радиус вращения центра шара

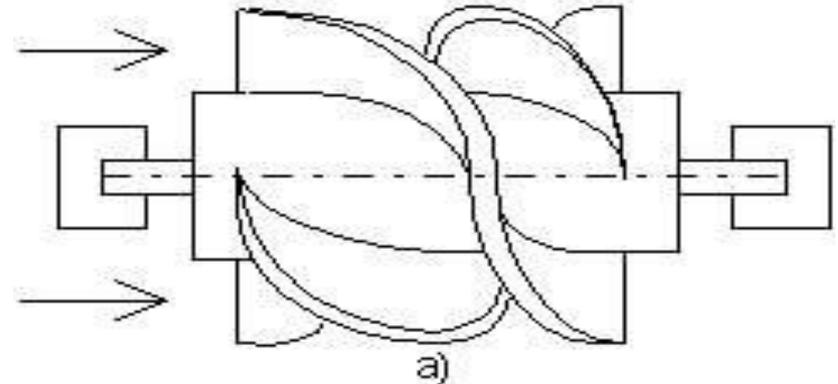
$$v = k \cdot Q_0$$

$$f = k \cdot Q_0 / (2\pi r)$$

# Тахометрические расходомеры

## Турбинные расходомеры

- **Турбинные расходомеры** определяют расходы жидкостей в широком диапазоне, в трубопроводах диаметром от 4 до 750 мм при давлениях до 250 МПа и температурах от -240 до +700°C
- **Достоинства - малая инерционность и высокая точность** (погрешность 0,5%)
- **Недостатки — зависимость от расхода и вязкости среды, износ опор турбины**



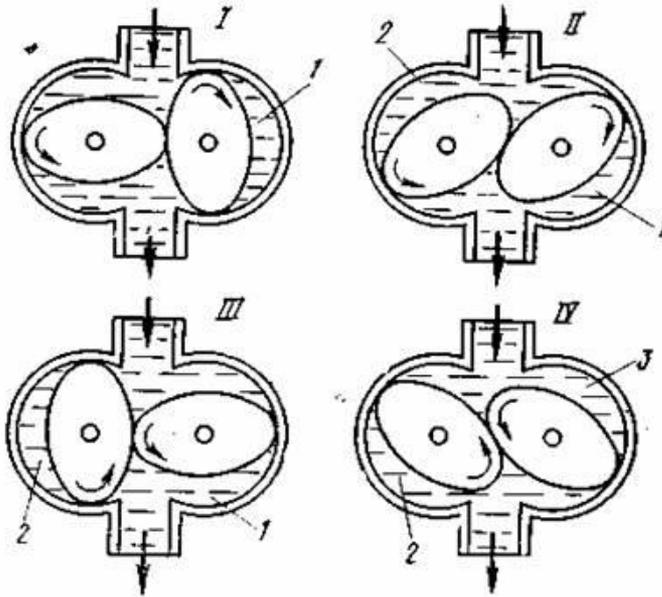
- Действие основано на измерении средней скорости потока  $V_{ср}$ , которая пропорциональна объемному расходу вещества
- $$G_0 = FV_{ср}$$
- Рабочее тело под действием потока вращается, при этом его угловая скорость вращения пропорциональна скорости потока вещества и объемному расходу

# Передающие преобразователи турбинных и шариковых расходомеров

В качестве *передающих преобразователей* турбинных и шариковых расходомеров применяют *магнитоэлектрические и дифференциально-трансформаторные* схемы. Магнитоэлектрические преобразователи создают значительный тормозной момент, поэтому их используют в трубопроводах диаметром более 200 мм, где возникают большие крутящие моменты. При меньших диаметрах применяют *дифференциально-трансформаторные* преобразователи, в которых лопасти турбины или шарик при вращении меняет ферромагнитную массу сердечника нижней катушки, вследствие чего на выходе возникает напряжение, модулированное по амплитуде сигналом, пропорциональным частоте вращения шарика или турбины. Далее этот сигнал усиливается и преобразуется в унифицированный сигнал постоянного тока

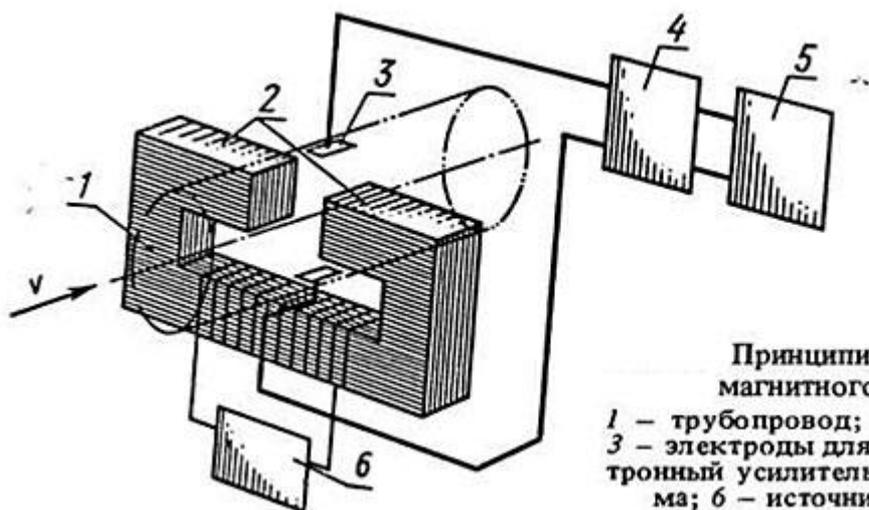
# Тахометрические расходомеры

## Камерные расходомеры



- Расходомер состоит из камеры, где устанавливаются две одинаковые, сцепленные между собой овальные шестерни или роторы, которые смонтированы на валах. При прохождении жидкости через расходомер роторы вращаются и проталкивают объем жидкости через измерительную камеру. Объем камеры известен. Магниты на роторах генерирует импульс. Затем эти импульсы используются для расчета расхода или роторы могут приводит в действие механический счетчик.

# Электромагнитные расходомеры



- **Действие основано на возникновении э.д.с в проводнике, пропорциональной скорости его движения в магнитном поле. Проводник - электропроводная жидкость, а магнитное поле создается внешними устройствами. Измеряя э.д.с, можно определить среднюю скорость жидкости и ее расход.**

# Достоинства и недостатки электромагнитных расходомеров

## Достоинства

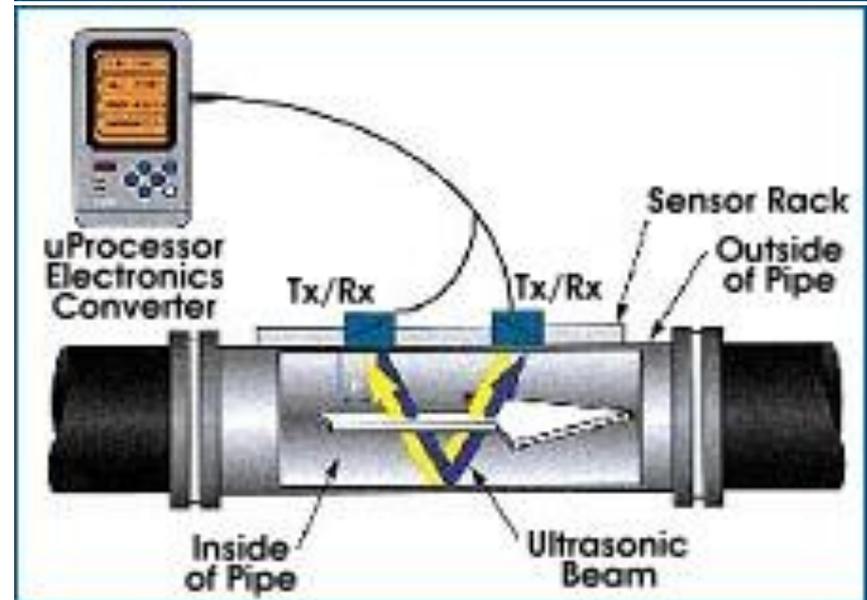
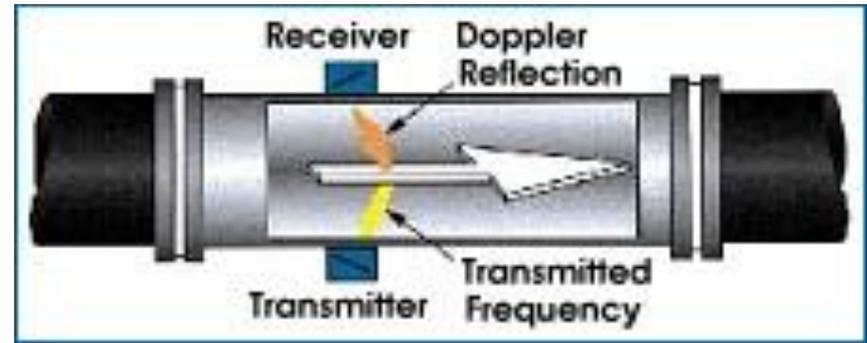
- ❑ не имеют частей, выступающих внутрь трубопровода, гидравлические потери минимальны.
- ❑ на показания не влияют физико-химические свойства измеряемой жидкости, если они не изменяют её электропроводность
- ❑ возможность измерять расход агрессивных и абразивных сред
- ❑ высокая стабильность показаний
- ❑ измерения очень малых ( $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ) и больших расходов жидкостей ( $3 \text{ м}^3/\text{с}$ ), диапазон измерения расходомера одного типоразмера достигает значения 500:1

## Недостатки

- ❑ чувствительность к помехам
- ❑ ограничения по электрической проводимости измеряемой среды
- ❑ поляризация измерительных электродов,
- ❑ трансформаторная ЭДС, источником которой является обмотка электромагнита (для компенсации вводят компенсирующие цепи)
- ❑ ёмкостный эффект, возникающий из-за большой разности потенциалов между системой возбуждения магнитного поля и электродами и паразитной емкости между ними (соединительные провода и т. п.).

# Ультразвуковые расходомеры

- ❑ для измерения расхода жидкостей
- ❑ Измерения основаны на зависимости скорости ультразвука относительно трубы от скорости потока
- ❑ состоят из излучателя и приемника ультразвуковых колебаний
- ❑ расходомеры с излучением, перпендикулярным потоку
- ❑ расходомеры с излучением по потоку и против него
- ❑ разделяют на частотные, фазовые и времяимпульсные



# Ультразвуковые расходомеры

- основные методы определения расхода жидкости:

- времяимпульсный метод (фазового сдвига)
- частотный (доплеровский)
- корреляционный

- Эффект Дóплера (1842) - изменение частоты и длины волн, регистрируемых приёмником, вызванное движением их источника или приёмника

$$\lambda = \frac{(c - v)}{\omega_0} \quad \omega = \frac{c}{\lambda} = \omega_0 \frac{1}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

где  $\omega_0$  — частота, с которой источник испускает волны,  $c$  — скорость распространения волн,  $v$  — скорость источника волн относительно среды,  $\omega$  -частота, регистрируемая неподвижным приёмником

# Ультразвуковые расходомеры

- **метод измерения** основан на зависимости скорости ультразвука относительно трубы от скорости потока
- основные трудности использования ультразвукового метода связаны с тем, что **скорость звука в среде значительно больше скорости среды** и зависит от ее **физико-химических свойств**
- необходимость применения специальных методов компенсации погрешностей
- расходомеры с излучением, **перпендикулярным** потоку

$$\theta = \arcsin(v_{cp} / c) \approx v_{cp} / c$$

- расходомеры с излучением **по потоку** - разница времени прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него
- **одноканальные или двухканальные схемы** (в одноканальной пьезоэлемент работает в режиме излучателя и в приемника)

# Ультразвуковые расходомеры

- По методу определения  $\Delta t$  ультразвуковые расходомеры подразделяются на **время-импульсные, частотные и фазовые**.
- Во **время-импульсных** расходомерах периодически производится измерение разности  $\Delta t$  времен прохождения очень коротких импульсов длительностью 0,1 – 0,2 мкс, по которой затем определяется объемный расход  $Q_0$ .
- В **частотных** расходомерах каждый последующий импульс посылается излучателем только после достижения предыдущим импульсом приемного пьезоэлемента. Разность частот следования импульсов по потоку и против него определяется дифференциальной схемой и связана со скоростью и объемным расходом.
- В **фазовых расходомерах** измеряется разность фаз  $\Delta \varphi$  ультразвуковых колебаний, распространяющихся по потоку и против него.

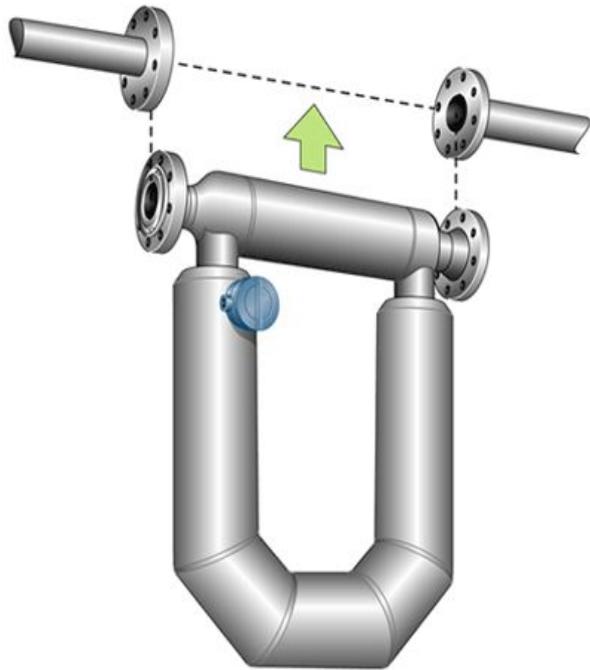
# Кориолисовые расходомеры

- **Кориолисовые расходомеры** — приборы, использующие для измерения массового расхода жидкостей, газов **эффект Кориолиса**. Принцип действия **основан на изменениях фаз механических колебаний U образных трубок**, по которым движется измеряемая среда. Сдвиг фаз пропорционален величине массового расхода. Поток с определенной массой, движущийся через входные ветви расходомерных трубок, создает **кориолисову силу**, которая сопротивляется вибрации расходомерных трубок (это сопротивление можно почувствовать, когда гибкий шланг извивается под напором воды, в него подаваемой).

# Кориолисовые расходомеры

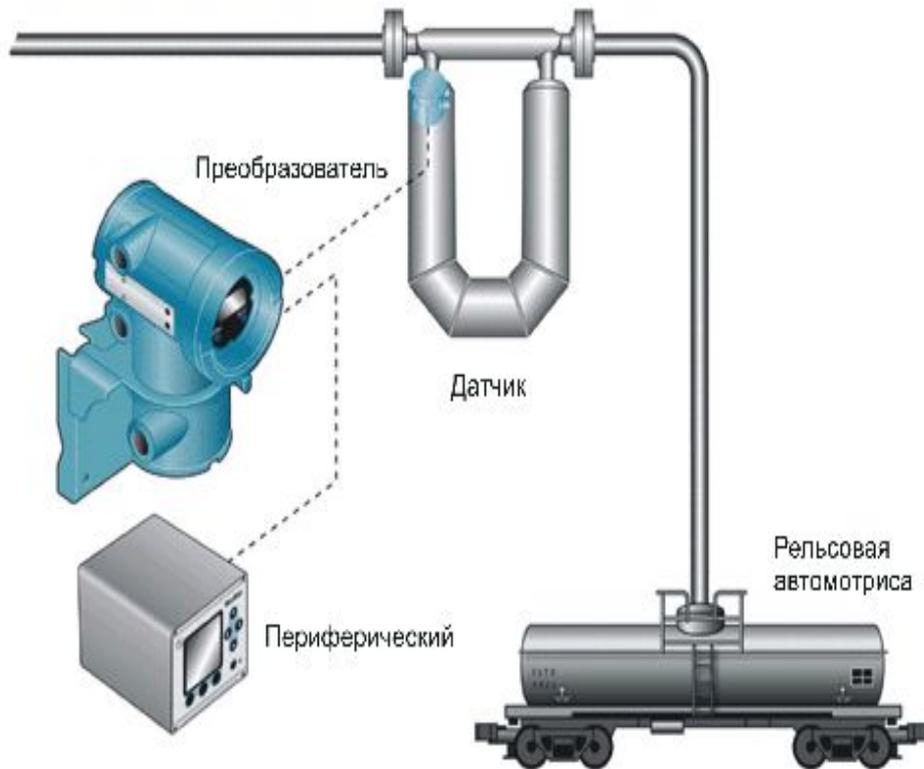
- высокая точность измерений параметров;
- работают вне зависимости от направления потока;
- не требуются прямолинейные участки трубопровода до и после расходомера;
- надёжная работа при наличии вибрации трубопровода, при изменении температуры и давления рабочей среды;
- длительный срок службы благодаря отсутствию движущихся и изнашивающихся частей;
- нет необходимости в периодической перекалибровке и регулярном техническом обслуживании;
- могут работать от разных источников питания с помощью самопереключающегося встроенного блока питания;
- измеряют расход сред с высокой вязкостью;
- разрешено использование в пищевой и фармацевтической промышленности.

# Кориолисовые расходомеры



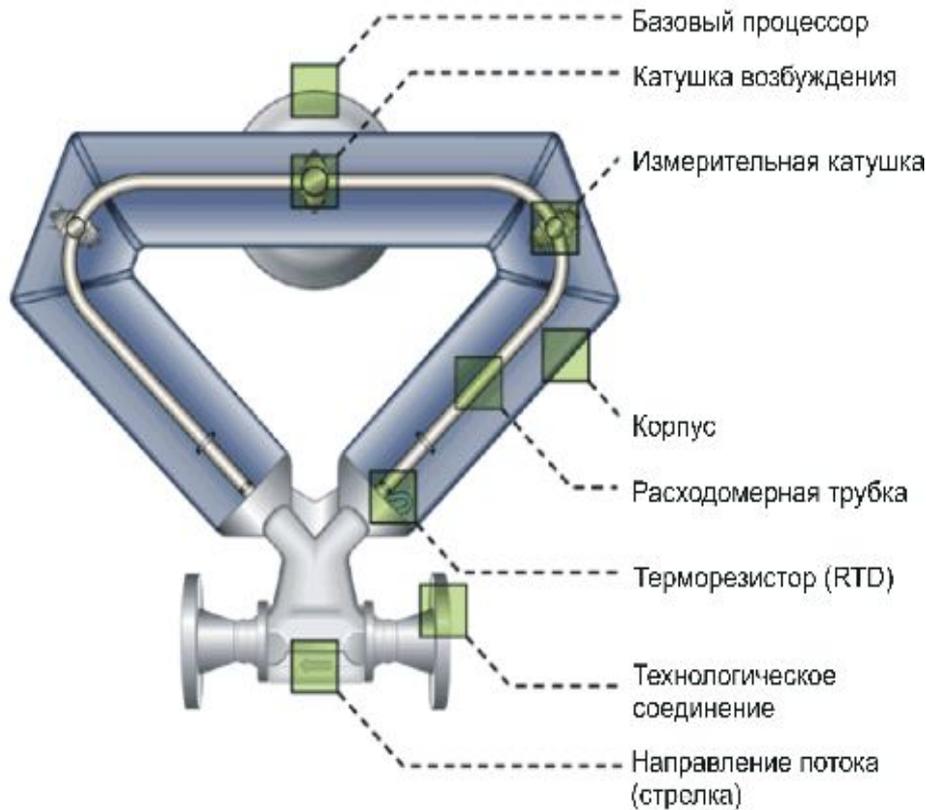
- использование многофункционального измерительного устройства, обеспечивающего точное измерение:
  - Массового расхода
  - Объемного расхода
  - Плотности
  - Температуры
- Увеличивает период эксплуатации, улучшает качество продукции за счет использования высокоточной ( $\pm 0,05\%$ ) и воспроизводимой измерительной технологии
- Снижает расходы на установку
- Сокращается технический уход и эксплуатационные расходы

# Кориолисовые расходомеры



- **Датчики** определяют расход (скорость потока), плотность и температуру
- **Преобразователи** представляют информацию датчиков в виде **выходных сигналов**
- **Периферические устройства** обеспечивают мониторинг, предупредительную сигнализацию и дополнительные функции

# Кориолисовые расходомеры



- Расходомерные трубки
- Катушка возбуждения и магнит
- Измерительная катушка и магнит
- RTD (терморезистор)
- Технологическое соединение
- Разделитель потока
- Базовый процессор
- Корпус

# Меточные расходормеры

- Принцип действия основан на измерении времени переноса метки потоком
- Виды меток:
  - радиоактивные
  - физико-химические
  - ионизационные
  - тепловые
  - оптические
  - электромагнитные
  - ЯМР (ядерно-магнитно-резонансные)
- Информативным параметром является время переноса метки потоком от источника ввода метки к первичному преобразователю, установленному дальше по ходу потока

# ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

- уровнемеры с визуальным отсчётом
- уровнемеры дистанционного измерения

## контактные методы

- волноводный
- поплавковый
- ёмкостной
- гидростатический
- буйковый
- кондуктивный

## бесконтактные методы

- зондирование звуком
- зондирование электромагнитным излучением
- зондирование радиационным излучением

# Поплавковый уровнемер



- ❑ используется для определения уровня жидкостей в открытых емкостях или резервуарах под давлением
- ❑ измерительная камера устанавливается вплотную к емкости таким образом, чтобы условия в измерительной камере и в емкости были одинаковыми
- ❑ Поплавок оснащен системой постоянных магнитов, которые предназначены для передачи измеренных значений уровня на локальный индикатор
- ❑ резервуар и измерительная камера образуют сообщающиеся сосуды и благодаря этому принципу уровень жидкости в камере всегда соответствует уровню в сосуде

# ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ УРОВНЕМЕРЫ

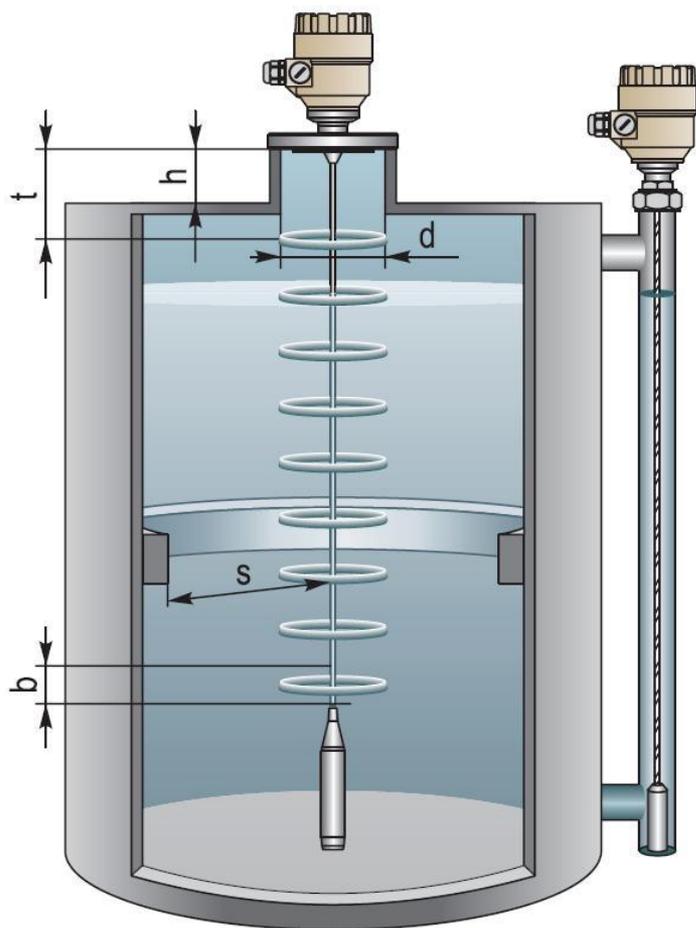


- Предназначены для измерения гидростатического давления столба жидкости требуемой высоты.

Зная плотность среды, прибор пересчитывает это давление в высоту столба жидкости.

Датчики состоят из мембраны, соединенной с сенсорным элементом, который работает либо на емкостном, либо на полупроводниковом принципе.

# Микроволновый уровнемер



- ❑ Датчик уровня использует электромагнитные импульсы, которые проходят по волноводу и отражаются от границы резкого изменения диэлектрической постоянной (границы между воздухом и продуктом)
- ❑ Излучаемые импульсы имеют низкую мощность и сконцентрированы вдоль зонда, излучаемая энергия почти не теряется
- ❑ Сила отраженного сигнала (амплитуда) будет почти одинаковой независимо от длины зонда.

# Микроволновый уровнемер



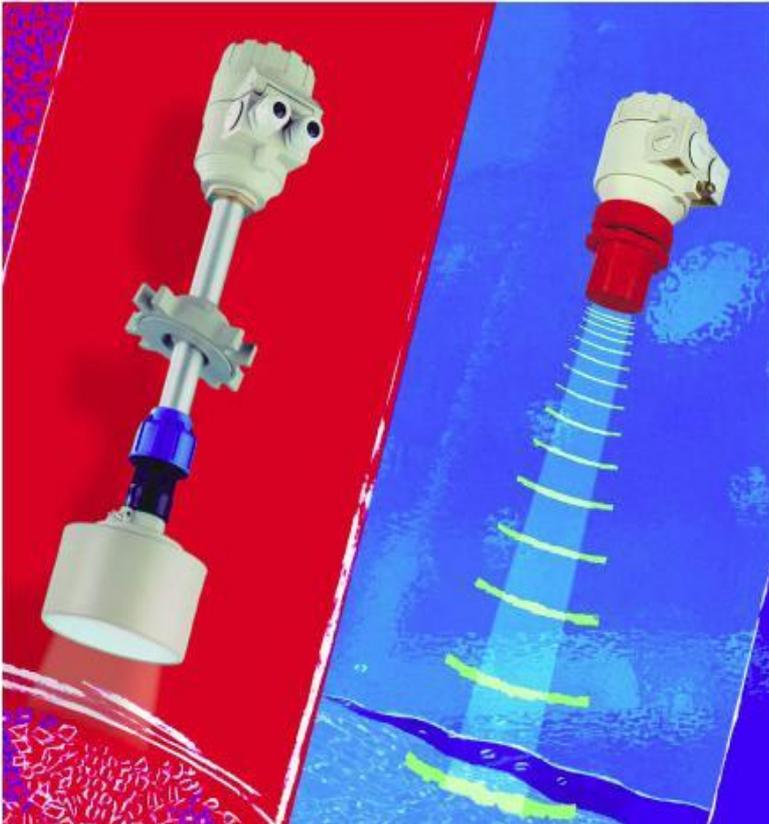
- ❑ Уровень измеряется путем измерения времени прохождения микроволнового импульса
- ❑ Микроволновый импульс излучается и принимается рупорной или стержневой антенной. Уровнемер измеряет время пролета электромагнитного сигнала
- ❑ Короткие микроволновые импульсы продолжительностью 0,8 нс направляются на продукт рупорной или стержневой антенной датчика уровня, отражаясь от поверхности продукта возвращаются обратно на уровнемер, который теперь выступает в роли приемника

# Вибрационный сигнализатор уровня



- ❑ Изменение среды, в которой происходят колебания вибрирующего штока датчика приводит к изменению резонансной частоты колебания.
- ❑ Значение резонансной частоты, на которое настроено переключение прибора, находится между частотой резонанса вибровилки в воздухе и частотой резонанса в среде. Это обеспечивает работу прибора со средами плотностью от  $50 \text{ кг/м}^3$
- ❑ **ПРИМЕНЕНИЕ:**  
Гранулы, мука, пластиковые гранулы, цемент, зола, и т. д.

# Ультразвуковой уровнемер



- ❑ измерение уровня основывается на измерении времени пролета акустического сигнала, излучаемого и принимаемого одним и тем же чувствительным элементом датчика после его отражения от поверхности продукта
- ❑ расстояние, которое прошел ультразвуковой импульс, равно произведению времени распространения импульса и скорости звука
- ❑ в излучателе прибора предусмотрен датчик температуры компенсирующий воздействие температуры.

# Кондуктивный сигнализатор уровня



Наличие продукта вызывает изменение сопротивления между двумя проводящими зондами, один из которых может быть проводящая стенка емкости

- ❑ Определение предельного значения уровня электропроводящих жидкостей в металлических емкостях или других сосудах может быть произведено используя изолированные от резервуара зонды через усилители тока, приводящие в работу переключающееся реле
- ❑ Когда уровень продукта повышается и замыкает контур между зондом и стенкой емкости, сопротивление в цепи уменьшается, что приводит к срабатыванию реле.

# ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

- **Влажность газов**
  - Абсолютная влажность (количество водяного пара, содержащегося в единице объема газа)
  - Влагосодержание (масса водяного пара к массе сухого газа)
  - Температура точки росы (при которой газ становится насыщенным содержащимся в нем водяным паром)
  - Относительная влажность (отношение абсолютной влажности к максимально возможной влажности этого газа при данной температуре)
- **Влажность твердых и сыпучих тел**
  - Влагосодержание – отношение массы влаги к массе абсолютного сухого тела
  - Влажность – отношение массы влаги к массе влажного тела

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА И ГАЗА ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

психрометрический, точки росы и гигрометрические

- **психрометрический** - основан на зависимости между **парциальным давлением пара** в парогазовой смеси и **показаниями сухого и мокрого термометров**

$$p_{н.м} - p = AB(t_c - t_m)$$

$p$  – парциальное давление пара в парогазовой смеси;  $p_{н.м}$  – парциальное давление насыщенного пара при температуре смеси  $t_m$ ;  $B$  – барометрическое давление;  $A$  – психрометрическая постоянная;  $t_c$  и  $t_m$  – температуры сухого и мокрого термометров

# ПСИХРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

$$\varphi = \frac{p}{p_{н.с}} 100 = \frac{100}{p_{н.с}} [p_{н.м} - AB(t_c - t_m)]$$

$p_{н.с}$  – парциальное давление насыщенного пара при температуре  $t_c$

**Психрометрическая постоянная  $A$  определяется условиями теплоотвода от термометра через фитиль в окружающую среду и другими факторами**

$$\varphi = f(t_c - t_m, t_c) \qquad \varphi = f\left(\frac{t_m - t_a}{t_c - t_b}\right)$$

# МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

## метод точки росы

- можно определить **абсолютную влажность** или **влажность**
- основным чувствительным элементом влагомеров, основанных на измерении температуры точки росы, является **зеркало, которое обдувается анализируемым газом**
- зеркало должно охлаждаться таким образом, чтобы на нем происходила **конденсация влаги**, находящейся в анализируемом газе. При этом должна фиксироваться температура, при которой начинается выпадение влаги (росы)

# ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТВЕРДЫХ И СЫПУЧИХ ТЕЛ

- **Прямые и косвенные** методы (определяющие влажность по параметру, функционально связанному с влажностью)
- электрические методы (**кондуктометрический, емкостный сверхвысокочастотный, инфракрасный**)
- **кондуктометрический метод** - зависимость электрического сопротивления от влажности для капиллярно-пористых тел

$$R = c / \omega^n$$

$c$  – постоянная;  $\omega$  – влажность материала;  $n$  – показатель степени  
сухой материал -  $10^8$  Ом·м, влажный -  $10^4$  Ом·м  
сухой материал – диэлектр. проницаемость 1÷6, вода - 81

# Кондуктометрический влагомер

- **игольчатые влагомеры** – измерение влажности производится путем измерения электрического сопротивления между двумя контактами (иглами) прибора, погруженными в исследуемый материал
- **электрическое сопротивление зависит от влажности материала.** При низких значениях влажности электрическое сопротивление очень высоко, поэтому затруднительно проводить измерения прибором игольчатого типа, например, в конце процесса сушки древесины при влажности 4-6 %. Так как максимальная глубина, на которой возможно измерение влажности, определяется длиной игл-электродов, то всегда известно на какой глубине в объекте контроля производятся измерения. Но иглы большой длины трудно «загнать» в контролируемый объект из-за возможности их повредить, поэтому в основном выпускаются приборы с иглами длиной до 3см
- **приборы, основанные на кондуктометрическом принципе измерения, хороши для контроля за влажностью на глубинах до 2-3 см и имеют широкий диапазон измерения влажности, но не подходят для контроля влажности до 4%**

# электромагнитный влагомер

- основан на измерении **диэлькометрической проницаемости** материала – затухании электромагнитных волн в зависимости от степени влажности материала
- имеют **неконтролируемую глубину измерения** (4-6 см), результатом чего является некая средняя влажность, но при этом не портится внешний вид поверхности
- имеют **высокую чувствительность** при невысоких значениях влажности (от 1-2%), возможность обнаружения переувлажненных участков под покрытиями, например под кафельной плиткой, могут контролировать влажность сыпучих материалов
- **нельзя точно** померить влажность свыше 50-60%, т.к. свыше этого диапазона погрешность их измерений не нормируется.

# Измеритель влажности древесины и бетона



- измерения основаны на зависимости диэлектрических свойств влажного материала с количеством влаги
- Преимущества
- Датчик влажности, интегрированный в корпус прибора
- "Плавающий" центральный электрод, адаптирующийся к неровностям поверхности
- Минимальная зависимость результата измерений от содержания во влажном материале растворимых солей, обычно сильно влияющих на точность измерений
- Повышенная точность измерений
- Малые габариты и вес