



# Методы и средства измерений и эталоны

## Лекция 8. Методы и средства измерения температуры

направление 27.04.01 «Стандартизация и метрология»  
Квалификация (степень) - МАГИСТР  
Форма обучения: очная

г. Казань  
2020-2021



Казанский федеральный  
УНИВЕРСИТЕТ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ЭТАЛОНЫ  
**ЛЕКЦИЯ 8. МЕТОДЫ И СИ ТЕМПЕРАТУРЫ**



**Фазлыяхматов Марсель Галимзянович**

К.т.н., ст. преподаватель каф. БМИиУИ  
Инженерный институт КФУ

<https://kpfu.ru/Marsel.Fazlyjyahmatov>

[mfazlyjy@kpfu.ru](mailto:mfazlyjy@kpfu.ru)  
+7 (927) 676-58-87



## Основные определения

**Температура** – физическая величина, характеризующая степень нагретости тела.

**Температура** является **интенсивной** величиной.

Измерять температуру можно только косвенным путём, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению.

Эти свойства тел называются **термометрическими**.



## Нулевое начало термодинамики

Изолированная термодинамическая система с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия и остаётся в нём сколь угодно долго, если внешние условия сохраняются неизменными.

Нулевое начало вводит понятие **эмпирической температуры** как параметра состояния, равенство которого во всех точках есть условие термического равновесия в системе без адиабатических перегородок.



## Термодинамическое определение

**Термометр** – средство измерения температуры. Измеряет эмпирическую температуру.

Для создания термометра необходимо ввести понятие **температурной шкалы**.



## Температурная шкала

**Температурная шкала** – конкретная функциональная числовая связь температуры со значением измеряемого термометрического свойства.

В эмпирической шкале температур устанавливаются две реперные точки и число делений между ними.

Реперные точки предложенных в XVIII в. шкал представляют собой температуры фазового равновесия чистых веществ.

Разность этих температур – основной температурный интервал.



## Температурная шкала Фаренгейта

Предложена Г. Фаренгейтом в 1724 году.

Единица – градус Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ ),  $1^{\circ}\text{F}$  равен  $1/180$  разности температур кипения воды и таяния льда при атмосферном давлении, а точка таяния льда имеет температуру  $+32^{\circ}\text{F}$ . Точка кипения воды же имеет температуру  $+212^{\circ}\text{F}$ .

Температура по шкале Фаренгейта связана с температурой по шкале Цельсия ( $t^{\circ}\text{C}$ ) соотношением:

$$t^{\circ}\text{C} = 5/9 (t^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$t^{\circ}\text{F} = 9/5 t^{\circ}\text{C} + 32$$



## Температурная шкала Реомюра

Предложена Р. А. Реомюром в 1730 году.

Единица – градус Реомюра ( $^{\circ}\text{Re}$ ),  $1^{\circ}\text{Re}$  равен  $1/80$  части температурного интервала между реперными точками – температурой таяния льда ( $0^{\circ}\text{Re}$ ) и кипения воды ( $80^{\circ}\text{Re}$ ).

В настоящее время шкала вышла из употребления.

$$1^{\circ}\text{Re} = 1.25^{\circ}\text{C}$$





## Температурная шкала Цельсия

Предложена А. Цельсием в 1742 г.

Единица – градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $1^{\circ}\text{C}$  равен  $1/100$  разности температур кипения воды и таяния льда при атмосферном давлении, а точка таяния льда имеет температуру  $0^{\circ}\text{C}$ . Точка кипения воды же имеет температуру  $+100^{\circ}\text{C}$ .



## Температурная шкала

Все вышеописанные шкалы построены на допущении линейной связи между температурой и термометрическим свойством, в качестве которого использовались расширение объёма жидкости или газа.

Позднее выяснилось, что показания термометров, имеющих разные термометрические вещества (ртуть, спирт), использующих одно и то же термометрическое свойство и равномерную градусную шкалу, совпадают лишь в реперных точках. Расхождение особенно заметно при температурах, расположенных далеко от основного интервала.



## Термодинамическая шкала Кельвина

Проблема создания шкалы, не зависящей от термометрических свойств веществ, была решена Кельвином в 1848 г.

Абсолютный ноль определён как 0 К, что равно  $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Шкала температур Кельвина – это шкала, в которой начало отсчёта ведётся от абсолютного нуля и называется – Абсолютная шкала температуры.

Единица абсолютной температуры – Кельвин (К).



## Термодинамическая шкала Кельвина

В 1954 г. Международный комитет мер и весов принял решение о переходе к определению термодинамической шкалы с использованием одной реперной точки – тройной точки воды.

Произошло новое определение кельвина, никак не связанное с интервалом 0–100 °С. Оно фактически закрепило за тройной точкой воды значение 273.16 К (0.01 °С) и «пустило в свободное плавание» около 100 °С точку кипения воды.

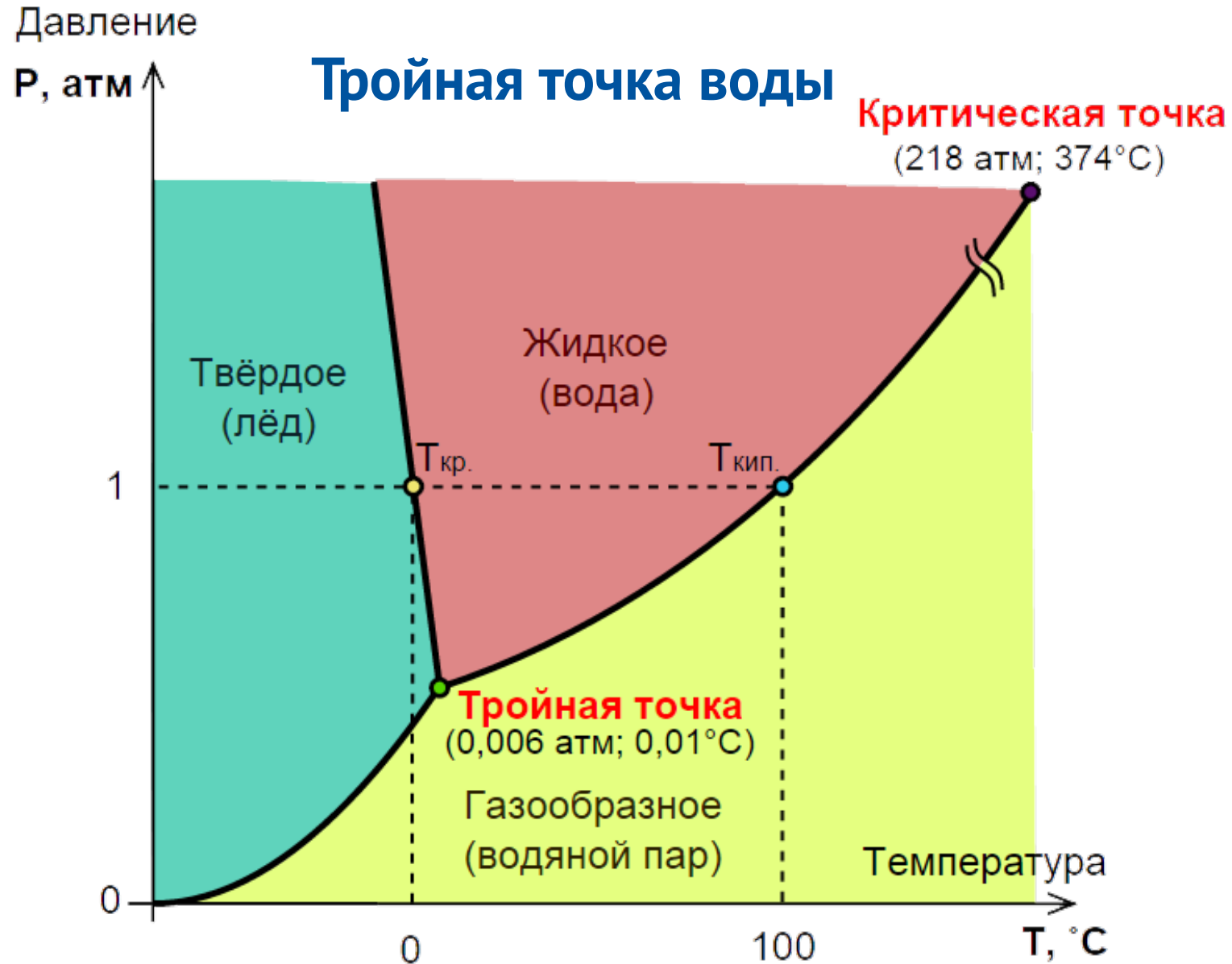
Вместо «градуса Кельвина» для единицы температуры был введён просто «Кельвин».



## Термодинамическая шкала Кельвина

В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам уточнила определение единицы термодинамической температуры как:

**Кельвин –  $1/273.16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.**





## Температурная шкала Цельсия

В настоящее время в системе СИ термодинамическую шкалу Цельсия определяют через шкалу Кельвина:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273.15.$$

По шкале Цельсия температура тройной точки воды равна  $\approx 0.008^{\circ}\text{C}$  и, следовательно, точка замерзания воды при давлении в 1 атм. очень близка к  $0^{\circ}\text{C}$ .

Точка кипения воды, изначально выбранная Цельсием в качестве второй реперной точки со значением, по определению равным  $100^{\circ}\text{C}$ , утратила свой статус одного из реперов.

По современным оценкам температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении в термодинамической шкале Цельсия составляет  $\approx 99,975^{\circ}\text{C}$ .



## Определение на основе молекулярно-кинетической теории

Теплота может рассматриваться просто как одна из форм энергии, а именно – кинетическая энергия атомов и молекул. Эта величина, усреднённая по огромному числу беспорядочно движущихся частиц, и оказывается мерилем того, что называется **температурой** тела.

Частицы нагретого тела движутся быстрее, чем холодного.





## Определение на основе молекулярно-кинетической теории

Если температура  $T$  измеряется в кельвинах (К), то связь её со средней кинетической энергией поступательного движения атомов идеального газа имеет вид:

$$E_k = \frac{3}{2}kT,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана (коэффициент, определяющий, какая часть джоуля содержится в кельвине).

Учитывая, что давление тоже может быть выражено через среднюю энергию движения молекул

$$p = \frac{2}{3}nE_k,$$

где  $n = N/V$ ,  $V$  – объем, занимаемый газом,  $N$  – полное число молекул в этом объёме.



## Определение на основе молекулярно-кинетической теории

Уравнение состояния идеального газа будет иметь вид:

$$p = nkT.$$

Если полное число молекул представить в виде  $N = \mu \cdot N_A$ , где  $\mu$  – число молей газа,  $N_A$  – число Авогадро, получаем уравнение Клапейрона – Менделеева:

$$pV = \mu RT,$$

где  $R$  – молярная газовая постоянная:  $R = N_A \cdot k$ .

Таким образом, **температура** – это искусственно введённый в уравнение состояния параметр.

Из такого определения температуры очевидно, что значения  $T$  будут зависеть от константы Больцмана.



## Определение на основе молекулярно-кинетической теории

Уравнение Клапейрона – Менделеева для одного моля:

$$pV = N_A kT$$

Из формулы следует, что приписав  $T$  при таком стабильном и хорошо воспроизводимом состоянии системы как тройная точка воды фиксированное значение 273.16 К, значение константы  $k$  можно определить экспериментально.



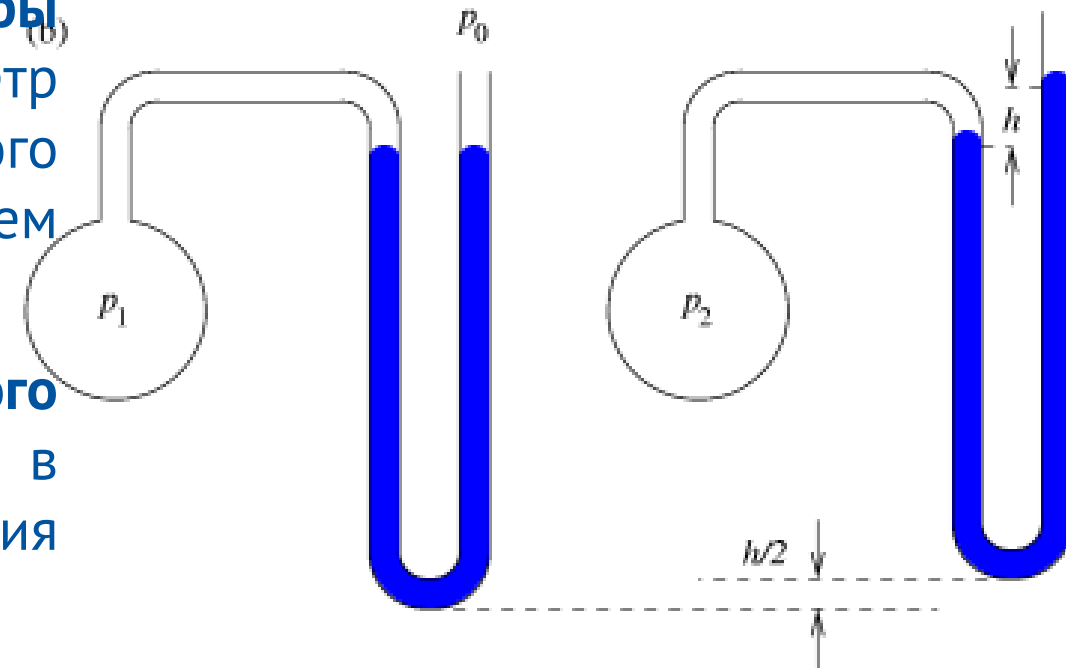
## Газовый термометр

Для измерения **термодинамической температуры** выбирается некоторый термодинамический параметр термометрического 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.

Диапазон измерений: **2 – 1300 К.**

Погрешность:  **$3 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$  К.**





## Термометры

**Термодинамические термометры** — 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.



## Международная практическая температурная шкала

В 1927 г. введена **практическая температурная шкала МТШ-27**, основу которой составляют температуры реперных точек (фазовых переходов чистых веществ), определённые методами первичной термометрии. В данных точках градуируются практические термометры (например, термометры сопротивления), которые затем и служат для измерения температуры и передачи размера единицы температуры.

Впоследствии шкала несколько раз переопределялась (**МПТШ-48, МПТШ-68, МТШ-90**).



## Международная температурная шкала МТШ-90

Международная температурная шкала (МТШ-90) введена в соответствии с решением XVIII Генеральной конференции по мерам и весам. **МТШ-90** основана на 16 реперных точках.

В качестве интерполяционных приборов в области низких температур **от 13.81 до 903.89 К** применяются платиновые термометры сопротивления и термопары.

В диапазоне температур **от 903.89 до 1337.58 К** применяется термопара платинородий – платина.

Для температур выше температуры затвердевания золота (**1337.58 К**) измерение производится с помощью пирометрических методов.

Для очень низких температур (**1.5–4.2 К**) эталоном температуры служит газовый термометр на основе гелия.



## Международная температурная шкала МТШ-90

Реперная точка		К	°С
He	Давление паров	3-5	- 270.15-268.15
e-H <sub>2</sub>	Тройная точка	13.8033	- 259.3467
e-H <sub>2</sub>	Давление паров	≈ 17	≈ - 256.15
e-H <sub>2</sub>	Давление паров	≈ 20.3	≈ - 252.85
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





## Международная температурная шкала МТШ-90

Реперная точка		К	°С
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
Ag	Точка затвердевания	1234.93	961.78
Au	Точка затвердевания	1337.33	1064.18
Cu	Точка затвердевания	1357.77	1084.62



## Дилатометрические термометры

Принцип работы дилатометрического термометра основан на удлинении металлического стержня при изменении температуры:

$$L_t = L_0(1 + \alpha t),$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения материала стержня.

Обычно в качестве чувствительного элемента используют трубку из металла с высоким  $\alpha$  (латунная трубка), внутри которой располагается стержень из материала с более низким  $\alpha$ , например, инвара, фарфора, кварца.

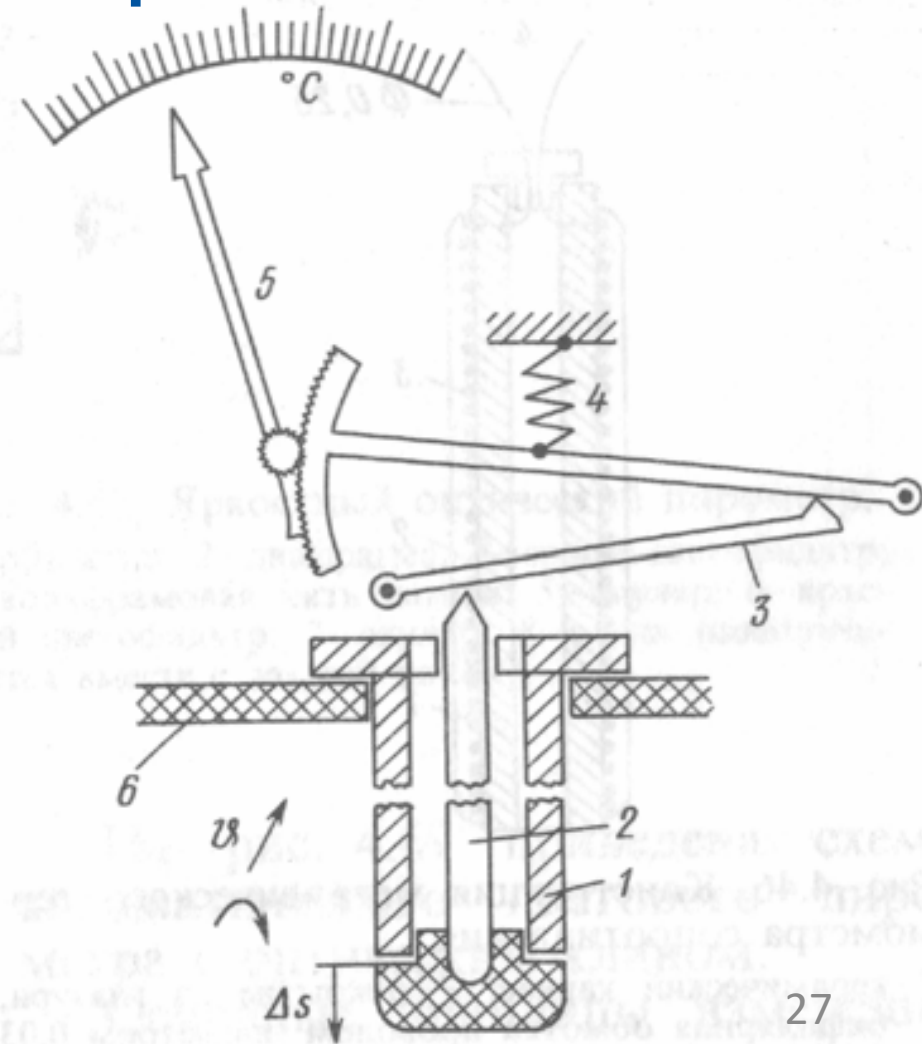


## Дилатометрические термометры

**Дилатометрический термометр** состоит из металлической трубки 1, которая при нагревании удлиняется. Это перемещение передаётся стержню 2, имеющему меньший коэффициент линейного расширения. Стержень воздействует на систему рычагов 3, приводящих стрелку 5 во вращательное движение. Пружина 4 служит для уравнивания.

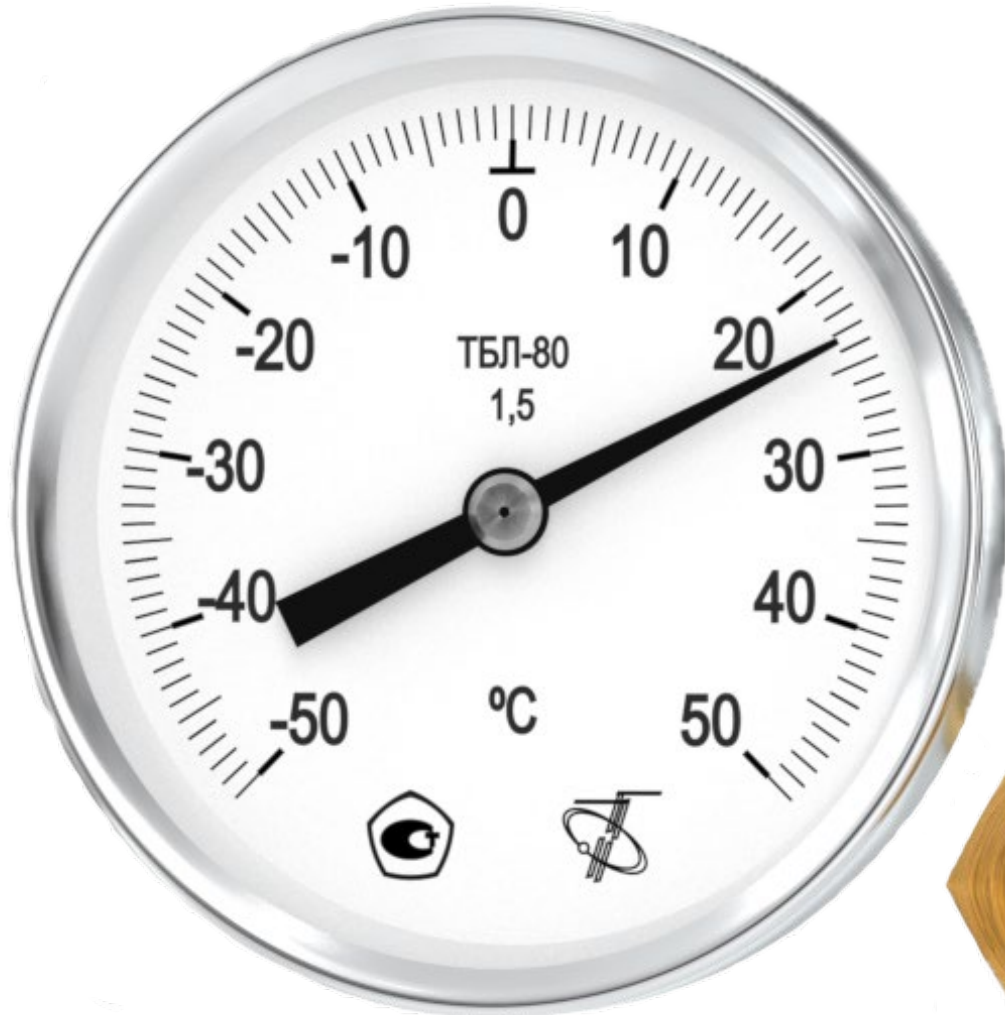
Диапазон измерений: **0 – 1000 °C.**

Приведенная погрешность: **1 – 3 %.**





## Дилатометрические термометры



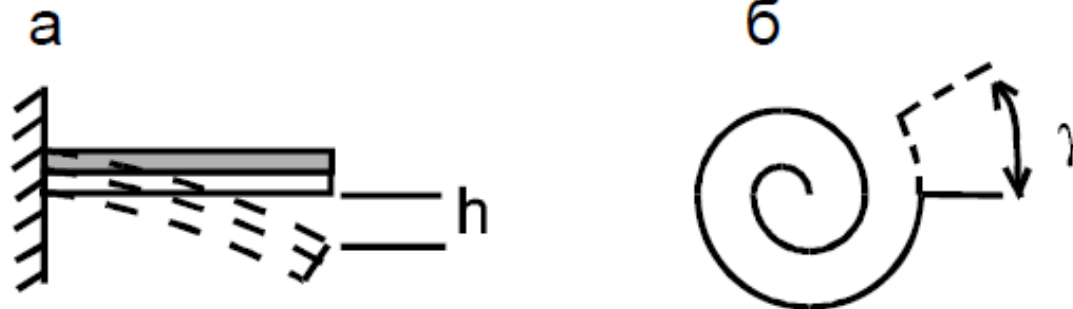


## Биметаллические термометры

**Биметаллические термометры** могут быть изготовлены весьма малых размеров, в этом их преимущество перед дилатометрическими. Они просты в изготовлении и дешёвы.

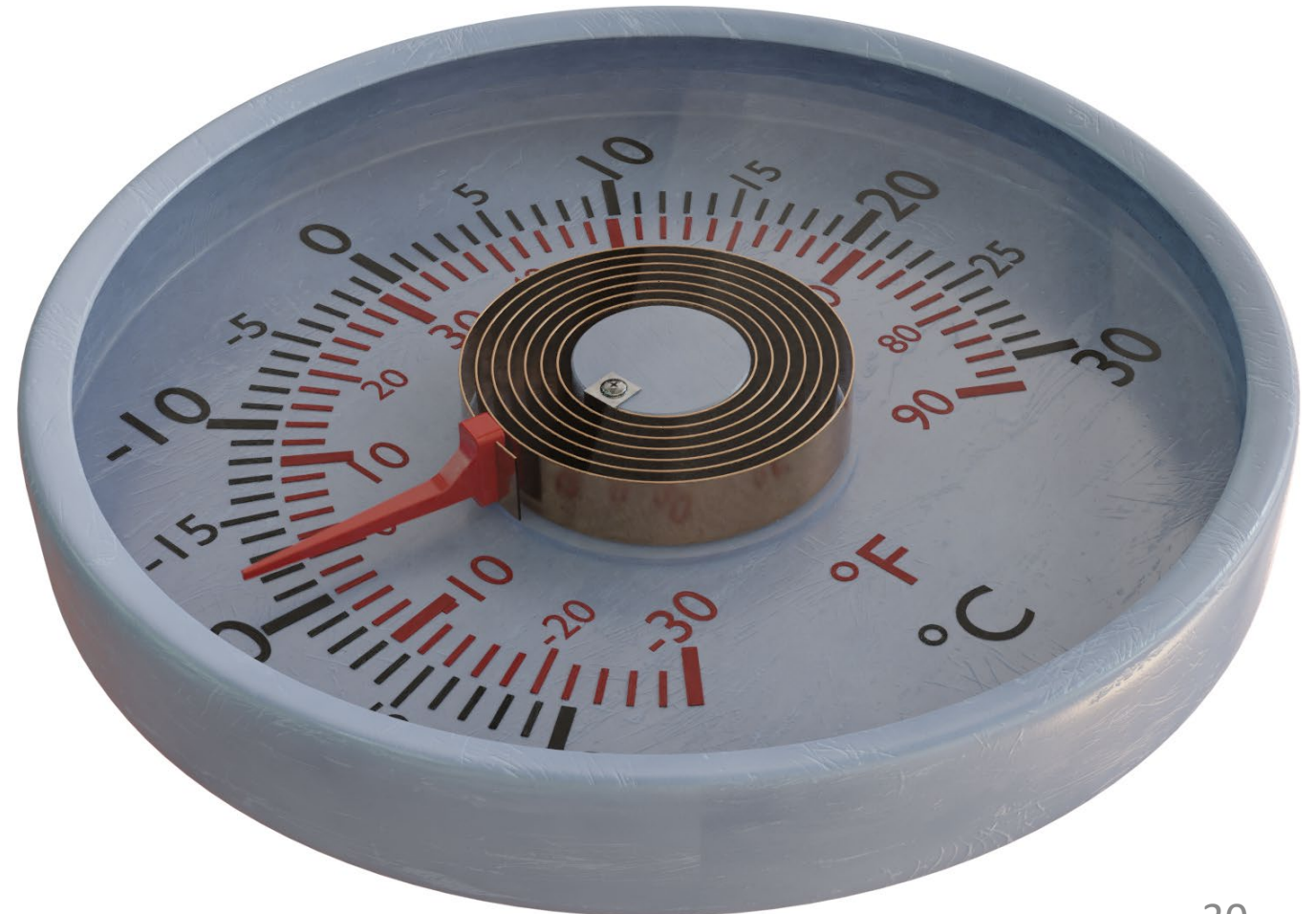
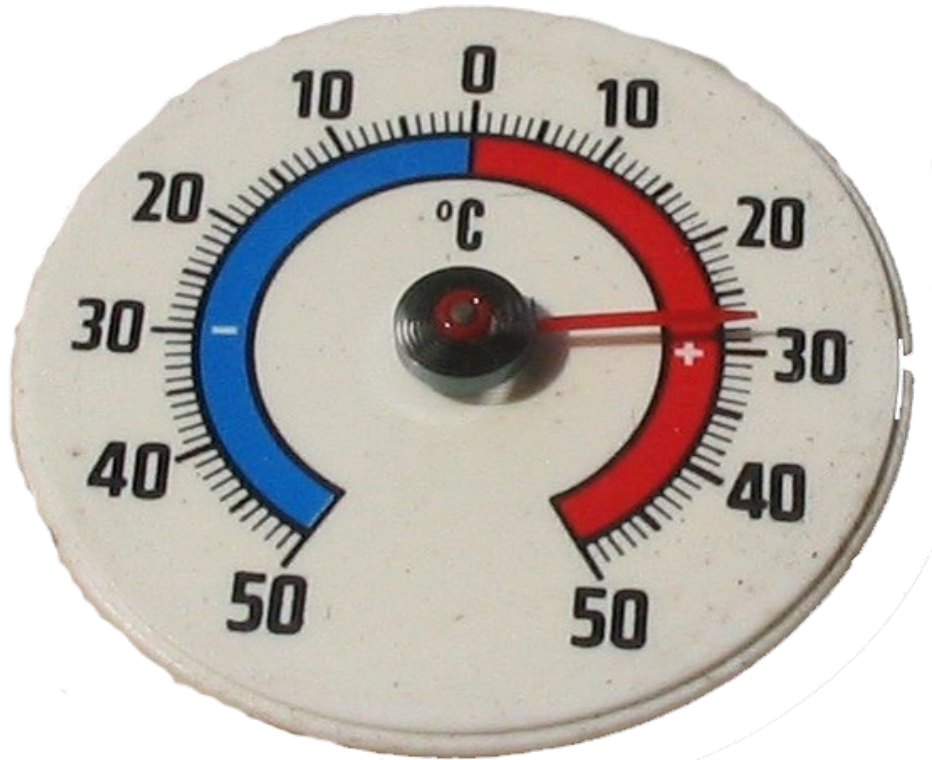
Вариант а используется, главным образом, в температурных реле (например, утюги); вариант б в виду большого отклонения свободного конца используют в термометрах непосредственного отсчёта.

Диапазон измерения от  $-50$  до  $+600$  °С, погрешность 1 – 3 %.





## Биметаллические термометры





## Стеклянные жидкостные термометры

Принцип действия основан на относительном расширении жидкости по сравнению с объёмом резервуара. Основная часть жидкости находится в шарообразном резервуаре, который является чувствительным элементом термометра. Резервуар сообщается с длинным и узким стеклянным капилляром.

Для заполнения термометров применяют смачивающие жидкости (органические) и несмачивающие (ртуть).

Шкалу термометра наносят на стеклянной пластине матового цвета, помещённой сзади капилляра, и вместе с ним помещённую в защитной стеклянной трубке.

В зависимости от диапазона измерений и требуемой точности цена деления шкалы может быть 0.1; 0.2; 0.5; 1.0 °С.



## Стеклянные жидкостные термометры

В промышленности их роль постепенно уменьшается, так как автоматизация технологических процессов все чаще требует дистанционной передачи результатов измерений.

Диапазон измерения стеклянных жидкостных термометров зависит от свойств термометрической жидкости:

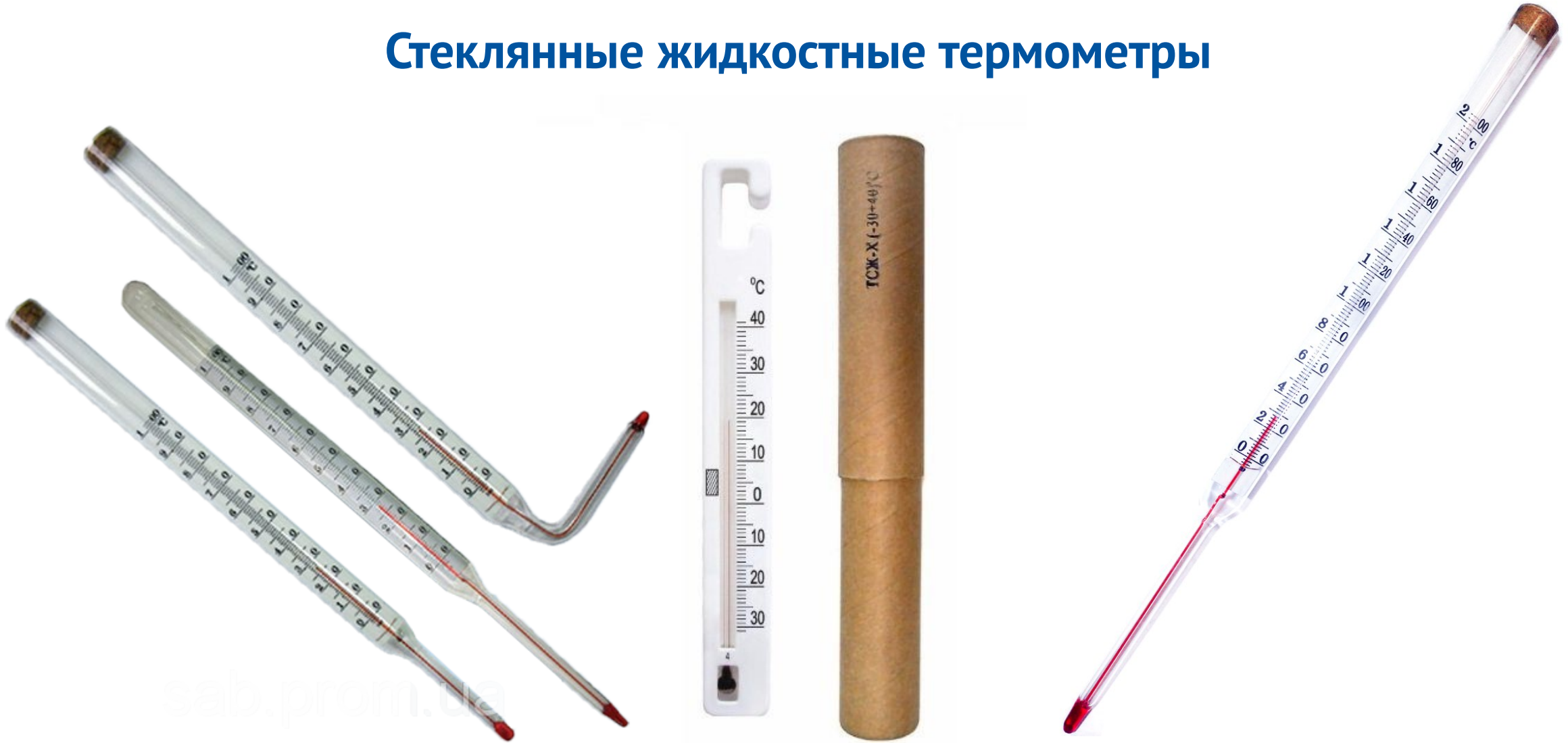
- этиловый спирт от  $-110$  до  $+210$  °С;
- ртуть в вакууме от  $-30$  до  $+150$  °С;
- ртуть под давлением от  $-30$  до  $+630$  °С;
- ртуть в кварцевом стекле от  $-30$  до  $+1000$  °С.

**ГОСТ 13646-68** Термометры стеклянные ртутные для точных измерений. Технические условия.





## Стеклянные жидкостные термометры



sab.prom.ua



## Термометры ртутные электроконтактные

**Термометры ртутные электроконтактные (ТПК-2...10-П/У)** выполнены в виде стеклянной цилиндрической оболочки с зауженной нижней частью с резервуаром, заполненным ртутью, к которому присоединена капиллярная трубка. В капиллярной трубке находится подвижный контакт, который дает возможность задать необходимую температуру, положение которого регулируется с помощью магнитного приспособления. Магнитное приспособление вращается, и вольфрамовая нить таким образом устанавливается на отметке задаваемой температуры.

**ТПК** имеют два конструктивных исполнения: **П – прямые (ТПК-П)** и **У – угловые (ТПК-У)**.

Столбик ртути является одним контактом, вторым является вольфрамовая нить.

Диапазоны измерений термометров **ТПК-2...10-П/У: от – 35 до + 350 °С** в зависимости от исполнения.



## Термометры ртутные электроконтактные





## Манометрические термометры

**Манометрические термометры** основаны на изменении объёма термометрического вещества в замкнутом объёме (чувствительном элементе), к которому подключён прибор, показывающий изменение объёма. Эти термометры просты, прочны, надёжны и не нуждаются ни в каком обслуживании. Разделяют на:

- газовые (ТГП) показывающие;
- жидкостные (ТЖП) показывающие;
- конденсационные (парожидкостные) (ТКП) показывающие;

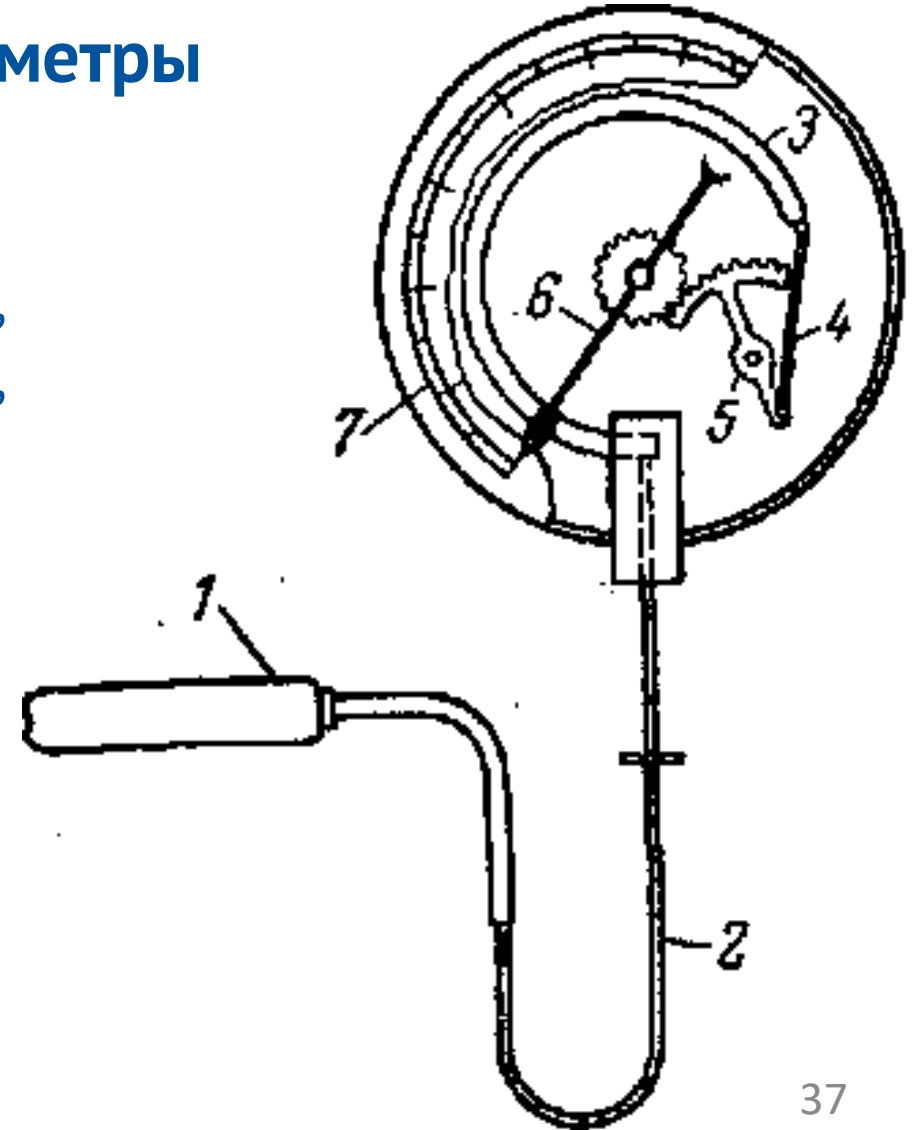
электроконтактные – ЭК (сигнализирующие – СГ) и самопищущие ТГС.

**ГОСТ 16920-93** Термометры и преобразователи температуры манометрические. Общие технические требования и методы испытаний.



## Манометрические термометры

**Манометрический термометр** состоит из чувствительного элемента – стального баллона, заполненного термометрическим веществом 1, подключённого к нему капилляра диаметром 0.1–0.2 мм 2 и указателя с манометрической пружиной (трубкой Бурдона) 3, которая преобразует расширение объёма жидкости биметаллическую пластину 4 и зубчатый сектор 5 во вращательное движение стрелки указателя температуры 6. Значение показывается на шкале прибора 7.





## Газовые манометрические термометры

Принцип работы основан на применении **закона Шарля (второго закона Гей-Люссака)**:

$$P_t = P_0(1 + \beta t),$$

где  $P_0$  и  $P_t$  – давление газа при температурах 0 и  $t$  (°C),  $\beta$  – термический коэффициент давления газа, равный  $1/273.15$  или  $0.00366 \text{ K}^{-1}$ .

Выражение для рабочего давления газового манометрического термометра:

$$\Delta P = P_K - P_H = P_H \frac{\beta(t_K - t_H)}{1 + \beta t_H},$$

где  $P_H$  и  $P_K$  – давление газа при температурах  $t_H$  и  $t_K$  (°C).



## Газовые манометрические термометры

Термометрическое вещество: азот или гелий

Диапазон измеряемых температур: от  $-200$  до  $+800$  °С



## Жидкостные манометрические термометры

Принцип работы основан на свойстве несжимаемости жидкости, то есть при изменении температуры от  $t_H$  до  $t_K$  из термобаллона объёмом  $V_T$  вытесняется жидкость  $\Delta V_T$ . Изменение объёма равно:

$$\Delta V = V_T (\beta_{ж} - 3\alpha)(t_K - t_H),$$

где  $\beta_{ж}$  – температурный коэффициент объёмного расширения жидкости,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала термобаллона.

Изменение давления в термосистеме  $\Delta P$  в отличие от газовых термометров не зависит от диапазона изменения  $t_K - t_H$ , ни от начального давления  $P_H$ .





## Жидкостные манометрические термометры

Термометрическое вещество: ртуть под давлением 10-15 МПа

Диапазон измеряемых температур: от – 30 до + 600 °С

Термометрическое вещество: толуол, ксилол под давлением 0.5-5 МПа

Диапазон измеряемых температур: от – 150 до + 400 °С



## Конденсационные манометрические термометры

Термобаллон такого термометра заполнен конденсатом на 0.7 – 0.75 объёма, а над конденсатом находится насыщенный пар этой жидкости. Капилляр и манометрическая пружина заполняется высококипящей жидкостью.

Принцип работы основан на зависимости давления  $P$  насыщенного пара от температуры  $T$ :

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{L}{T(V_{\text{П}} - V_{\text{Ж}})},$$

где  $L$  – скрытая теплота испарения,  $V_{\text{П}}$  и  $V_{\text{Ж}}$  – удельные объёмы пара и жидкости.



## Конденсационные манометрические термометры

Термометрическое вещество: пропан, этиловый эфир, ацетон, толуол

Диапазон измеряемых температур: от – 50 до + 300 °С

Термометрическое вещество: гелий  $^3\text{He}$

Диапазон измеряемых температур: от 0.2 до 3.316 К

Термометрическое вещество: гелий  $^4\text{He}$

Диапазон измеряемых температур: от 0.5 до 5.195 К



## Погрешности манометрических термометров

### Газовые:

- изменение температуры окружающей среды (установка биметаллической пластины, инварный компенсатор);
- изменение барометрического давления (увеличение размера термобаллона).

### Жидкостные:

- изменение температуры окружающей среды (установка биметаллической пластины, инварный компенсатор);
- гидростатическая погрешность, вызванная различным расположением манометра относительно термобаллона (смещение указателя).



## Погрешности манометрических термометров

### Конденсационные:

- гидростатическая погрешность, вызванная различным расположением манометра относительно термобаллона (смещение указателя).
- изменение барометрического давления (имеет место на начальном участке шкалы).



## Манометрические термометры





## Термопреобразователи сопротивления

Измерение температуры **термопреобразователями сопротивления** основано на свойстве металлов и полупроводников изменять своё электрическое сопротивление с изменением температуры.

Термопреобразователи позволяют измерять температуру в пределах **от – 200 до + 850 °С**.

Металлы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$ . Для большинства чистых металлов он равен от  $4 \cdot 10^{-3}$  до  $6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , что составляет увеличение электрического сопротивления при повышении температуры на один градус примерно на 0.4 – 0.6 % от сопротивления при 0 °С.



## Термопреобразователи сопротивления

Для изготовления стандартизованных термопреобразователей сопротивления в настоящее время применяют **платину (ТСП), медь (ТСМ)**.

**ГОСТ 6651-2009** Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний.

**ГОСТ 8.461-2009** Государственная система обеспечения единства измерений. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки





## Термопреобразователи сопротивления

**Платина** – наилучший материал для термопреобразователей сопротивления.

Температурный коэффициент сопротивления:  $\alpha = 3.91 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  или  $3.85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Платиновые преобразователи сопротивления используются для измерения температуры **от – 200 до + 850 °С**.

Платиновые термопреобразователи сопротивления используются в качестве рабочих, образцовых и эталонных термопреобразователей сопротивления и чувствительных элементов.

С помощью последних осуществляется воспроизведение международной шкалы температур в диапазоне **от – 182.97 до 630.5 °С**.



## Термопреобразователи сопротивления

### Достоинства

- легко получается в чистом виде;
- обладает хорошей воспроизводимостью;
- химически инертна в окислительной среде при высоких температурах;
- высокое удельное сопротивление  $10^{-7}$  Ом·м.

### Недостатки

- нелинейность функции  $R_t = f(t)$ ;
- очень дорогой металл.



## Термопреобразователи сопротивления

Для промышленных платиновых термометров сопротивления используется уравнение **Каллендара-Ван Дьюзена**, с известными коэффициентами, которые установлены экспериментально и нормированы в **ГОСТ 6651-2009** (для  $\alpha = 3.91 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ):

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)] \quad (-200 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}),$$

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 850 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

где  $R_T$  – сопротивление при  $T \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $R_0$  – сопротивление при  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ , и константы (для платинового сопротивления):

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$



## Термопреобразователи сопротивления

**Медь** – один из недорогостоящих металлов, легко получаемых и чистом виде.

Температурный коэффициент сопротивления:  $\alpha = 4.28 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  или  $3.85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Медные преобразователи сопротивления используются для измерения температуры **от – 180 до + 200 °С**.

При более высоких температурах медь активно окисляется и потому не используется.



## Термопреобразователи сопротивления

### Достоинства

- легко получается в чистом виде;
- линейная или близкая к линейной функция  $R_t = f(t)$ ;
- невысокая стоимость.

### Недостатки

- сильная окисляемость при повышенных температурах;
- малое удельное сопротивление.



## Термопреобразователи сопротивления

Для промышленных медных термометров сопротивления (ГОСТ 6651-2009) используются уравнения (для  $\alpha = 4.28 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ):

$$R_T = R_0[1 + AT + BT(T + 6.7) + CT^3] \quad (-180 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T < 0 \text{ } ^\circ\text{C}),$$

$$R_T = R_0(1 + AT) \quad (0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 200 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

где  $R_T$  – сопротивление при  $T \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $R_0$  – сопротивление при  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ , и константы (для медного сопротивления):

$$A = 4.28 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -6.2032 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = 8.5154 \times 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$$



## Термопреобразователи сопротивления

**Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления** применяются для измерения температуры **от – 100 до + 300 °С**.

В качестве материалов для них используются различные полупроводниковые вещества – оксиды магния, кобальта, марганца, титана, меди, кристаллы германия.

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления редко используются для измерения температуры.

Они находят широкое применение в системах температурной сигнализации.



## Термопреобразователи сопротивления

### Достоинства

- большой отрицательный температурный коэффициент сопротивления;
- значительное удельное сопротивление.

### Недостатки

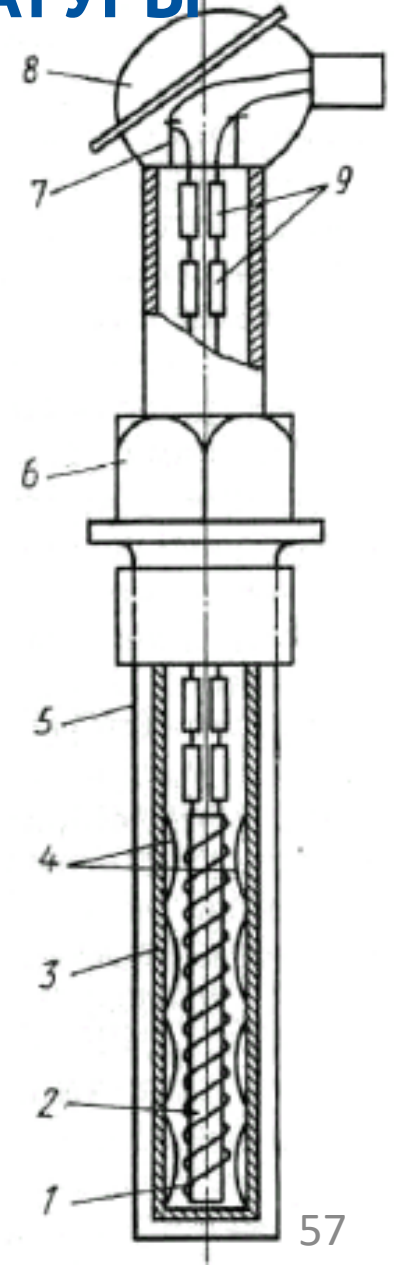
- значительная нелинейность функции  $R_t = f(t)$ ;
- невозпроизводимость градуировочной характеристики.





## Термопреобразователи сопротивления

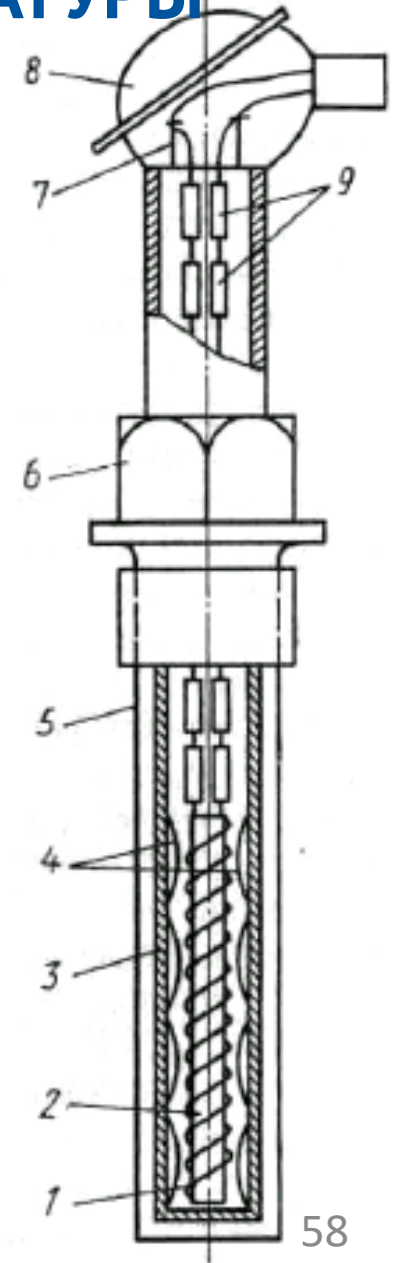
Тонкая проволока или лента 1 из платины или меди наматывается бифилярно на каркас 2 из керамики, слюды, кварца, стекла или пластмассы. После намотки обычно неизолированной платиновой проволоки каркас вместе с проволокой покрывают слюдой. Длина намотанной части каркаса с платиновой проволокой 50-100 мм, а с медной - 40 мм. Каркас для защиты от повреждений помещают в тонкостенную алюминиевую гильзу 3, а для улучшения теплопередачи от измеряемой среды к намотанной части каркаса между последней и защитной гильзой 3 устанавливаются упругие металлические пластинки 4 или массивный металлический вкладыш.





## Термопреобразователи сопротивления

Гильзу 3 с её содержимым помещают во внешний, обычно стальной, замкнутый чехол 5, который устанавливается на объекте измерения с помощью штуцера 6. На внешней стороне чехла располагается соединительная головка 8, в которой находится изоляционная колодка 7 с винтами для крепления выводных проводов, идущих от каркаса через изоляционные бусы 9.





## Термопреобразователи сопротивления





## Кварцевые термопреобразователи

Основаны на принципе преобразования температуры измеряемой среды в частотный непрерывный электрический сигнал за счёт измерения разности частот колебаний кварцевого генератора с термочувствительным резонатором и опорного кварцевого генератора.

Диапазон измерения температур: от  $-80$  до  $+250$  °С;

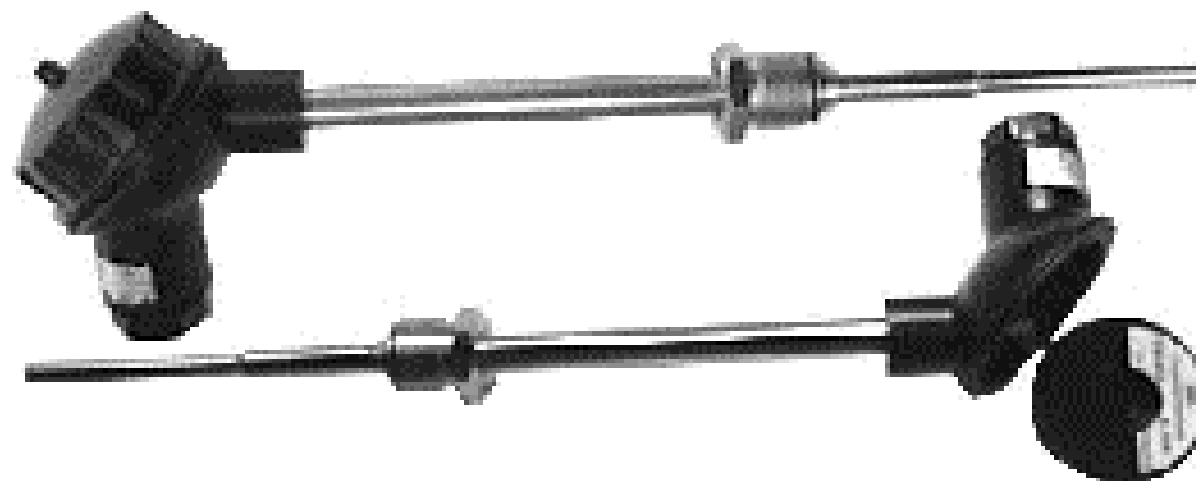
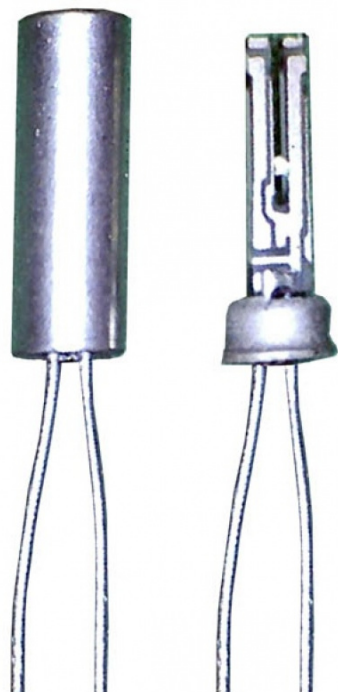
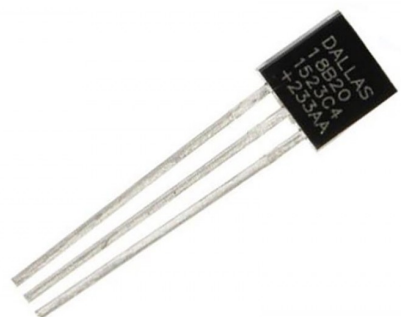
Чувствительность: до  $10^3$  Гц/К;

Временная стабильность:  $0.02$  К в год;

Разрешающая способность:  $10^{-4} - 10^{-7}$  К.



## Кварцевые термопреобразователи

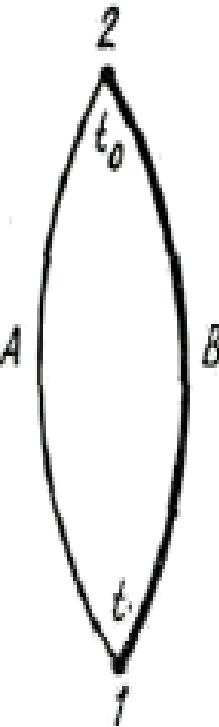




## Термоэлектрические термометры

Измерение температуры термоэлектрическими термометрами - **термоэлектрическими преобразователями** основано на использовании открытого в 1821 г. Зеебеком **термоэлектрического эффекта**.

**Термоэлектрический преобразователь** представляет собой цепь, состоящую из двух или нескольких соединённых между собой разнородных проводников. На рисунке представлена термоэлектрическая цепь, состоящая из двух проводников (термоэлектродов) А и В. Места соединений термоэлектродов 1 и 2 называют спаями.





## Термоэлектрические термометры

Зеебеком было установлено, что если температуры спаев  $t$  и  $t_0$  не равны, то в замкнутой цепи будет протекать электрический ток. Направление этого тока, называемого **термотоком**, зависит от соотношения температур спаев, если  $t > t_0$ , то ток протекает в одном направлении, а если  $t < t_0$  - в другом.

При размыкании такой цепи на её концах может быть измерена так называемая **термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС)**.

Рассматриваемый эффект обладает и обратимым свойством, заключающимся в том, что если в такую цепь извне подать электрический ток, то в зависимости от направления тока один из спаев будет нагреваться, а другой охлаждаться (**эффект Пельтье**).



## Термоэлектрические термометры

Контактная разность потенциалов и диффузия электронов - слагаемые результирующей термо-ЭДС цепи, значение которой зависит в итоге от материала термоэлектродов и разности температур спаев термоэлектрического преобразователя.

**ГОСТ Р 8.585-2001** Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования



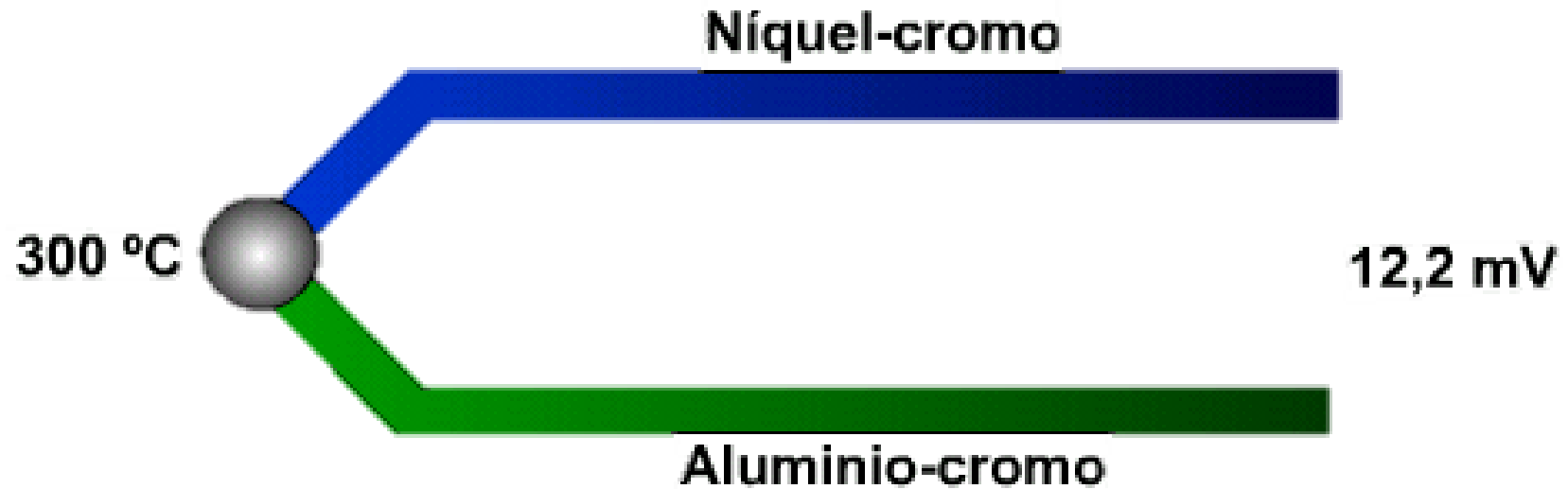


## Термоэлектрические термометры





## Термоэлектрические термометры





## Термоэлектрические термометры

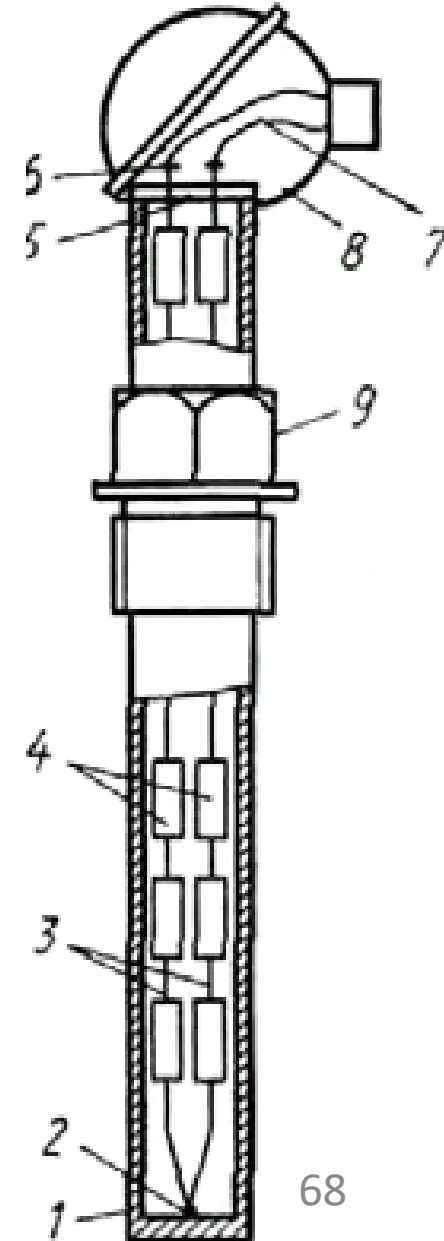
Требования к материалам термоэлектродов:

- однозначная и по возможности близкая к линейной зависимость термо-ЭДС от температуры, жаростойкость и механическая прочность;
- химическая инертность;
- термоэлектрическая однородность материала проводника по длине, что позволяет восстанавливать рабочий спай без переградуировки;
- технологичность изготовления с целью получения взаимозаменяемых по термоэлектрическим свойствам материалов;
- невысокая стоимость;
- стабильность и воспроизводимость термоэлектрических свойств.



## Термоэлектрические термометры

В жёсткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 3 с надетыми на них изоляционными бусами 4. Спай 2 касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника. К термоэлектродам в головке 8 винтами 6 на розетке 5 подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нем с помощью штуцера 9.





## Термоэлектрические термометры

Для обеспечения надёжного контакта спай 2 изготавливают сваркой, реже пайкой или скруткой (для высокотемпературных ТЭП).

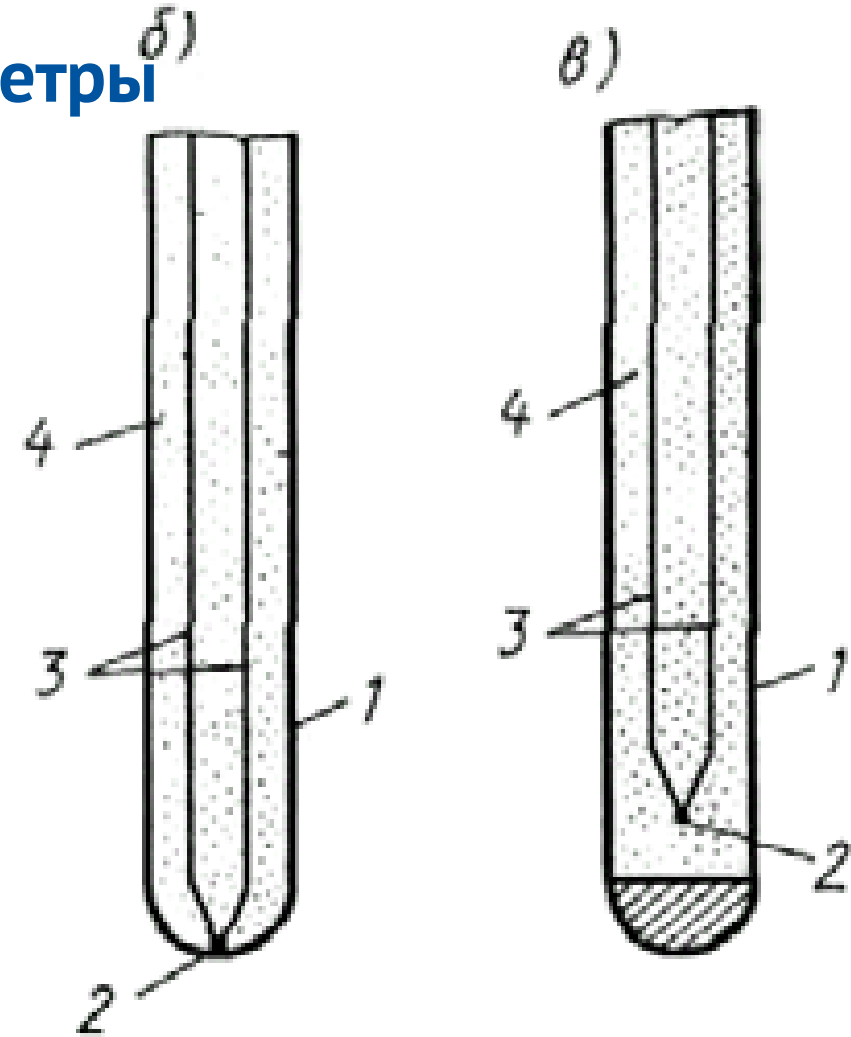
Защитную гильзу 1 выполняют в виде цилиндрической или конической трубки из газонепроницаемых материалов диаметром примерно 15-25 мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до 2500 - 3500 мм. Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы из тугоплавких термометров соединений, а также кварц и фарфор.

Диаметр термоэлектродов составляет 2-3 мм, кроме термоэлектродов платиновой группы, диаметр которых 0,5 мм, что связано с их высокой стоимостью.

## Термоэлектрические термометры

Существуют термоэлектрические термометры кабельного типа.

В тонкостенной оболочке 1 размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком 4. Рабочий спай 2 может иметь контакт с оболочкой (б) или изолируется от неё (в).





## Термоэлектрические термометры

Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром от 0,5 до 6 мм, длиной от 10 до 30 см. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры используются в интервале температур от – 50 до 300 °С при давлении 40 МПа. Внутри оболочки кабеля помещены от одного до трёх ТЭП.



## ЛЕКЦИЯ 8. МЕТОДЫ И СИ ТЕМПЕРАТУРЫ

### Характеристики термопар

Хим. состав термоэлектродов положительный - отрицательный	Диапазон измеряемых температур, °С	Погрешность, °С
Хромель (Ni 89-91%, Cr 8.7-10%, Fe 1%, Mn 0,2%) – Копель (Cu 55%, Ni 43-44%, Fe 2-3%)	– 50 ÷ 600	± (2.2-5.8)
Хромель – Алюмель (Ni 93-96%, Al 1.8-2.5%, Mn 1.8-2.2%, Si 0.8-1.2%)	– 50 ÷ 1000	± (4.0-9.7)
Платинородий (Pt 90% Rh 10%) – Платина (Pt 100%)	0 ÷ 1300	± (1.2-3.6)
Платинородий (Pt 70% Rh 30%) – Платинородий (Pt 94% Rh 6%)	300 ÷ 600	± (3.2-5.2)
Вольфрам-Рений (W 95%, Re 5%) – Вольфрам-Рений (W 80%, Re 20%)	0 ÷ 2200	± (5.4-9.7)





Термоэлектрический преобразователь	Градуировка	ТермоЭДС при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , мВ
Хромель – Копель (ТХК)	ХК (Тип L)	$6.90 \pm 0.3$
Хромель – Алюмель (ТХА)	ХА (Тип К)	$4.10 \pm 0.15$
Платинородий – Платина (ТПП)	ПП (Тип R, S)	$0.64 \pm 0.03$
Платинородий – Платинородий (ТПР)	ПР30/6 (Тип В)	0.431
Вольфрам-Рений – Вольфрам-Рений (ТВР)	ВР5/20 (Тип А-1, А-2, А-3)	1.33

Требования и характеристики установлены в МЭК 60584-1, МЭК 60584-2, ГОСТ Р 8.585-2001.



## Пирометры

Бесконтактные методы измерения температуры основаны на измерении энергии излучения тел.

Характеристикой теплового излучения является **спектральная светимость** или **интенсивность монохроматического излучения**, которая представляет собой **спектральную плотность** – количество энергии, излучаемой телом с единицы поверхности в единицу времени и на единицу диапазона длин волн.



## Пирометры

**Абсолютно чёрное тело (АЧТ)** – физическое тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах.

**Абсолютно чёрное тело** само может испускать электромагнитное излучение любой частоты и визуально иметь цвет. Спектр излучения абсолютно чёрного тела определяется только его температурой.

Зависимость спектральной светимости  $R_{\lambda}^*$  АЧТ от абсолютной температуры  $T$  и длины волны  $\lambda$ :

$$R_{\lambda}^* = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1},$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – постоянные.



## Пирометры

Интеграл от спектральной светимости по всем длинам волн даёт интегральную интенсивность излучения:

$$S^* = \int_0^{\infty} R_{\lambda}^* d\lambda \approx \sigma T^4,$$

где  $\sigma$  – постоянный коэффициент.



## Пирометры

Интенсивность излучения реальных тел меньше интенсивности АЧТ, находящегося при той же температуре. Поэтому вводятся поправочные коэффициенты «неполноты» излучения  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_\lambda$ :

$$S = \varepsilon S^*, \quad R_\lambda = \varepsilon_\lambda R_\lambda^*.$$

Значения коэффициентов различны для разных тел.



## Пирометры

Пирометр – прибор для бесконтактного измерения температуры. Принцип действия основан на измерении **интенсивности (мощности)** теплового излучения объекта.

**IEC TS 62492-1:2008** Industrial process control devices - Radiation thermometers - Part 1: Technical data for radiation thermometers



## Пирометры

По принципу действия пирометры подразделяются на:

- пирометры полного излучения (радиационные);
- пирометры частичного излучения (радиационные);
- пирометры спектрального отношения (цветовые).

**ГОСТ 28243-96** Пирометры. Общие технические требования.

- оптические с исчезающей нитью (яркостные).

**ГОСТ 8.130-74** ГСИ. Пирометры визуальные с исчезающей нитью общепромышленные. Методы и средства поверки



## Пирометры

По конструктивному исполнению пирометры подразделяются на:

- стационарные;
- переносные;
- комбинированные.

По методу прицеливания пирометры подразделяются на:

- с оптическим наведением;
- лазерным прицелом.





## Пирометры

**Пирометр полного излучения** – пирометр, действие которого основано на использовании зависимости интегральной энергетической яркости излучателя от температуры.

**Пирометр частичного излучения** – пирометр, действие которого основано на использовании зависимости энергетической яркости излучателя от температуры в ограниченном интервале длин волн.

**Пирометр спектрального отношения** – пирометр, действие которого основано на зависимости отношений энергетических яркостей в двух или нескольких спектральных интервалах от температуры тела.



## Пирометры

В качестве датчиков пирометров используются:

- черные и серые приёмники (термические) – датчики температуры (терморезисторы, термопары), закреплённые на зачернённых принимающих излучение пластинках. Их чувствительность не зависит от длины волны.
- селективные чувствительные элементы – фотоэлементы, фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы. Абсолютная чувствительность селективных чувствительных элементов намного выше.



## Радиационные пирометры

**Радиационный пирометр** – прибор, измеряющий полную интегральную интенсивность излучения или в ограниченном интервале длин волн.

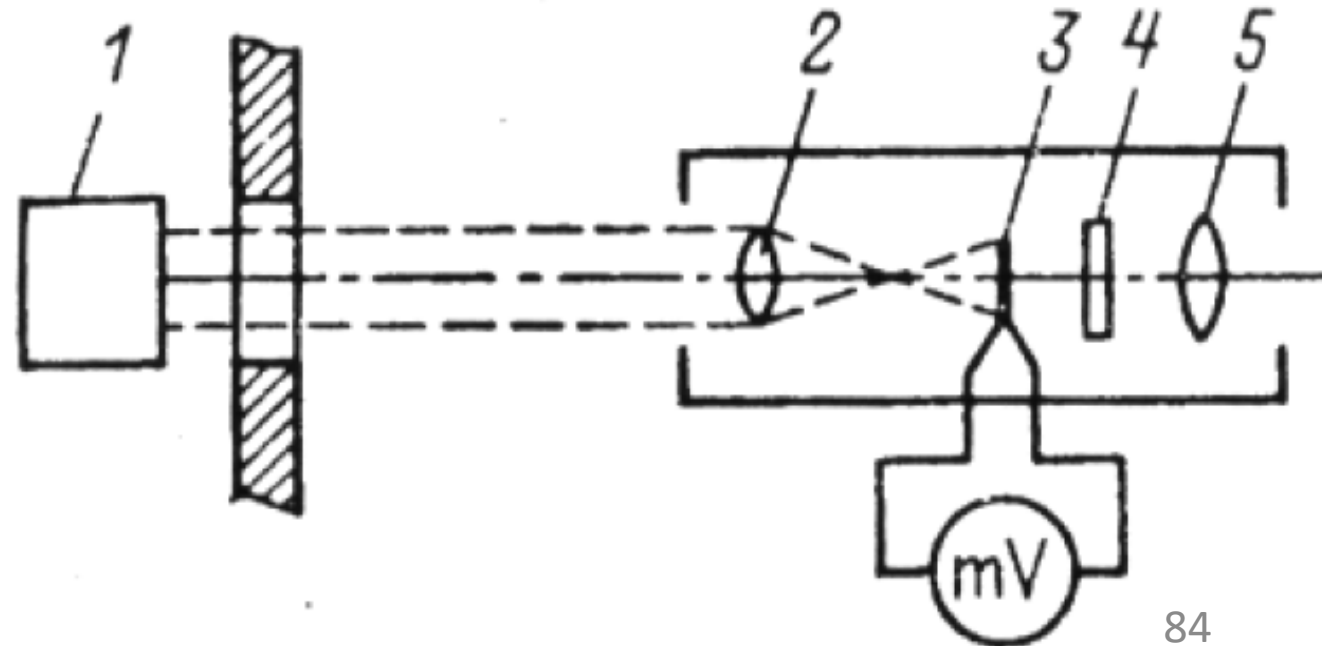
Радиационные пирометры используются для измерения температуры от  $-50$  до  $2500$  °С (полного излучения) и от  $-30$  до  $4000$  °С (частичного излучения).

Прибор измеряет интегральную интенсивность  $S$  излучения реального объекта. Поэтому необходимо учитывать реальное значение коэффициента неполноты излучения  $\varepsilon$ .

## Радиационные пирометры

Внутри телескопа, имеющего объектив 2 и окуляр 5, расположена термобатарея из последовательно включённых термопар 3. Рабочие концы термопар находятся на платиновой лепестке, покрытом платиновой чернью. Телескоп наводится на объект измерения так, чтобы лепесток полностью перекрывался изображением объекта 1 и вся энергия излучения воспринималась термобатареей.

Термо-ЭДС термобатареи является функцией мощности излучения, а следовательно, и температуры тела. Для защиты глаза используется светофильтр 4.





## Радиационные пирометры





## Радиационные ИК пирометры

Принцип действия **радиационных ИК-пирометров (ИК-термометров, или инфракрасных термометров излучения, инфракрасных оптических термометров)** основан на измерении абсолютного значения излучаемой энергии одной волны в инфракрасном спектре. На сегодня это наиболее популярный бесконтактный метод измерения температуры.

Такие приборы могут наводиться на объект с любой дистанции и ограничены лишь диаметром измеряемого пятна и прозрачностью окружающей среды.

Существует множество разновидностей пирометров и инфракрасных приборов.



## Стационарные радиационные ИК пирометры





## Стационарные радиационные ИК пирометры







## Переносные радиационные ИК пирометры





## Бытовые медицинские ИК термометры





## Цветовые пирометры

**Цветовые пирометры** или **пирометры спектрального отношения** основаны на измерении отношения интенсивностей излучения на двух длинах волн, выбираемых обычно в красной или синей областях спектра.

Цветовые пирометры используются для измерения температуры от 200 до 3000 °С (частичного излучения) с основной погрешностью  $\pm 1-2\%$ .



## Цветовые пирометры

Раньше цветовой пирометр содержал один канал измерения интенсивности монохроматического излучения со сменными светофильтрами.

В настоящее время в основном используются несколько приемников излучения (чаще всего два), работающих в указанных спектральных диапазонах.

Недостатком таких приборов является их относительная сложность.



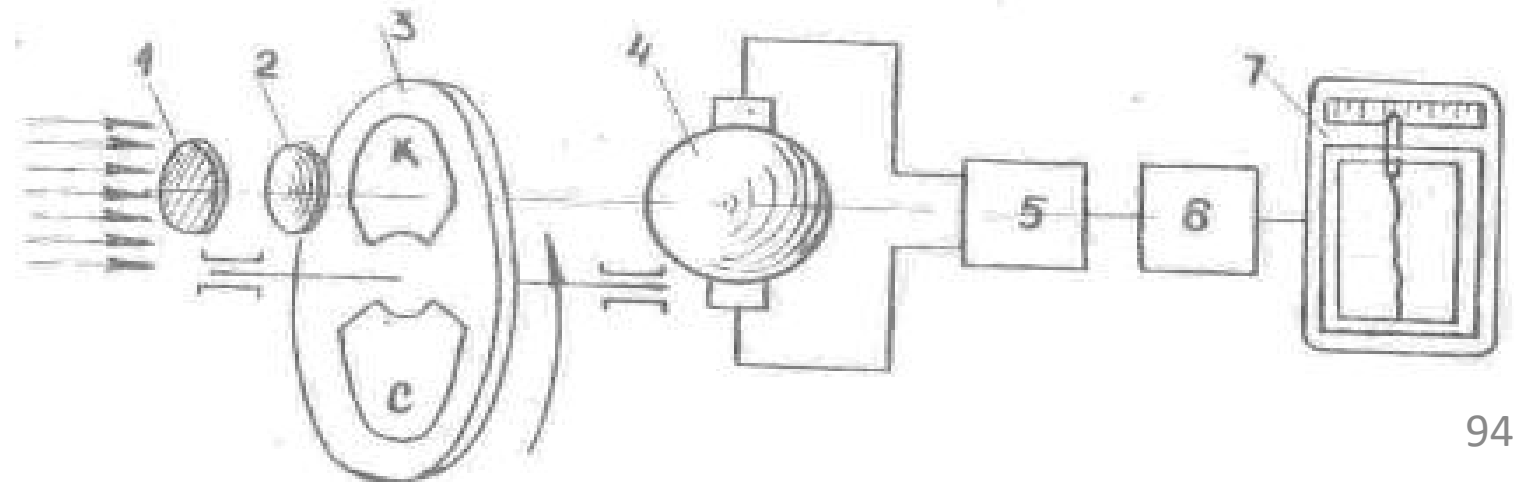
## Цветовые пирометры

Достоинства цветковых пирометров:

- неполнота излучения исследуемого объекта не вызывает погрешности измерения температуры;
- показания цветковых пирометров принципиально не зависят от расстояния до объекта измерения, а также от поглощения излучения в промежуточной среде, если коэффициенты поглощения одинаковы для обеих длин волн.

## Цветовые пирометры

Излучение объекта измерения через защитное стекло 1 и объектив 2 падает на фотоэлемент 4. Между объективом и фотоэлементом установлен вращающийся диск (обтюратор) 3, в который вставлены два светофильтра – красный и синий. Благодаря этому фотоэлемент попеременно освещается красным и синим светом и выдаёт поочерёдно импульсы тока, пропорциональные монохроматическим яркостям красного и синего излучений накали́нного тела.





## Цветовые пирометры





## Яркостные пирометры

Работа **яркостного пирометра** или **пирометра с пропадающей нитью** основана на сравнении излучения поверхности со значением излучения нити, по которой проходит электрический ток. Величина силы тока и является значением исследуемой температуры объекта.

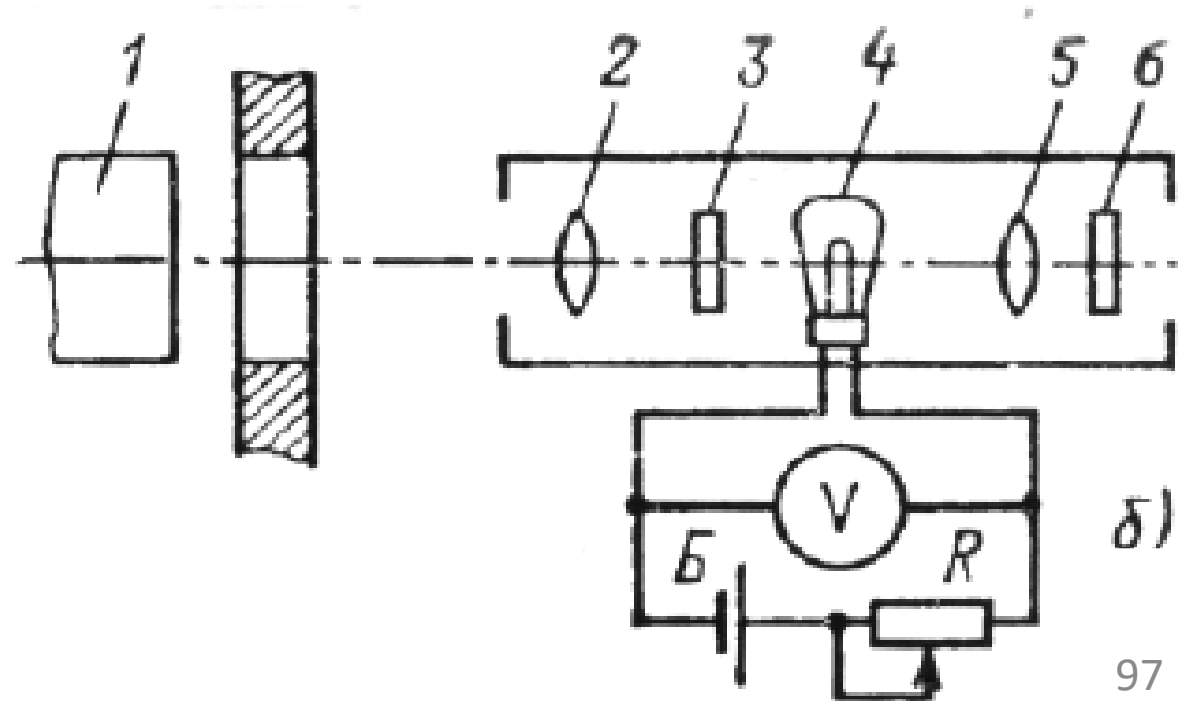
Яркостные пирометры обеспечивают более высокую точность измерений температуры, чем радиационные.

Яркостный пирометр типа «Проминь» предназначен для измерения яркостной температуры в пределах 800 - 4000 °С.



## Яркостные пирометры

В яркостном пирометре с исчезающей нитью объектив 2 фокусирует изображение исследуемого тела 1 на плоскость, в которой расположена нить 4 специальной лампы накаливания. Через окуляр 6 и красный фильтр 5, позволяющий выделять узкую спектральную область около длины волны  $\lambda_{\text{э}} = 0,65$  мкм, нить рассматривают на фоне изображения тела и, изменяя ток накала нити, добиваются, чтобы яркости нити и тела были одинаковыми (нить становится неразличимой на фоне тела).





## Яркостные пирометры

Шкалу прибора, регистрирующего ток накала, градуируют обычно в °С или К, и в момент выравнивания яркостей нити и тела прибор показывает так называемую яркостную температуру  $T_b$  тела. Истинная температура тела  $T$  определяется на основе законов теплового излучения Кирхгофа и Планка по формуле:

$$T = \frac{c_2 T_b}{c_2 + \lambda_3 T_b \ln \alpha_{\lambda, T}},$$

где  $c_2 = 0,01488$  м·К (2-я постоянная излучения),  $\alpha_{\lambda, T}$  – коэффициент поглощения тела,  $\lambda_3$  – эффективная длина волны пирометра.





## Яркостные пирометры

Основная погрешность обусловлена:

- неполнотой излучения реальных физических тел;
- поглощением излучения промежуточной средой, через которую производится наблюдение;
- нестабильностью температурной лампы;
- индивидуальными особенностями глаза наблюдателя.



## Яркостные фотоэлектрические пирометры

У **яркостных фотоэлектрических пирометров** излучение действует на фотоэлектрические приёмники.

Погрешность образцовых лабораторных фотоэлектрических пирометров не превышает сотых долей К при  $T \sim 1000$  К.

Образцовые яркостные пирометры приняты в качестве основных интерполяционных приборов, определяющих Международную практическую температурную шкалу (МТШ-90) при температурах выше точки затвердевания золота ( $1064.43$  °С).



## Акустические термометры

**Акустические термометры** основаны на зависимости скорости распространения звука в газах от их температуры. Акустический термометр содержит пространственно разнесённые излучатель акустических волн и приёмник, включаемые в цепь автогенератора, частота колебаний которого меняется с изменением температуры.



## Тепловизоры

**Тепловизор** — устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Распределение температуры отображается на дисплее как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета.

Изучение тепловых изображений называется **термографией**.

**ГОСТ Р 8.619-2006** Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки.

**ГОСТ Р 53466-2009** Оптика и оптические приборы. Тепловизоры медицинские. Общие технические требования. Методы измерений основных параметров.



## Тепловизоры

Тепловизоры разделяются на:

- наблюдательные – показывают градиенты температур объекта;
- измерительные – позволяют измерить значение температуры заданной точки объекта с точностью до коэффициента излучения материала объекта.



## Тепловизоры

Датчики тепловизоров:

- электронно-вакуумные (пирикон, термикон и фильтрскан) – в настоящее время не используются;
- твердотельные одноэлементные – для получения двумерного изображения оснащались электромеханической оптической развёрткой. Тепловизоры на их основе – сканирующие;
- матричные датчики температуры – болометры, которые представляют собой матрицу миниатюрных тонкопленочных терморезисторов. Инфракрасное излучение, собранное и сфокусированное на матрице объективом тепловизора, нагревает элементы матрицы в соответствии с распределением температуры наблюдаемого объекта.





## Тепловизоры





## Шумовые термометры

**Шумовые термометры** основаны на зависимости шумового напряжения на резисторе от температуры. Эта зависимость определяется формулой Найквиста:

$$U_{ш}^2 = 4kTRf,$$

где  $U_{ш}^2$  – средний квадрат напряжения шума;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $R$  – сопротивление резистора;  $\Delta f$  – полоса воспринимаемых частот.



## Шумовые термометры

Практическая реализация метода заключается в сравнении шумов двух идентичных резисторов, один из которых находится при известной температуре, а другой – при измеряемой.

Достоинством шумовых термометров является принципиальная возможность измерения термодинамической температуры на основе физической закономерности.

Однако выходной параметр – среднеквадратическое значение напряжения шумов – очень трудно измерять точно вследствие его малости и сопоставимости с уровнем шума усилителя.



## Термометры ядерного квадрупольного резонанса

**Термометры ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР)** основаны на взаимодействии градиента электрического поля кристаллической решётки и квадрупольного электрического момента ядра, вызванного отклонением распределения заряда ядра от сферической симметрии. Это взаимодействие обуславливает прецессию ядер, частота которой (частота ЯКР) зависит от градиента электрического поля решётки и для различных веществ имеет значения от сотен килогерц до тысяч мегагерц.

Градиент электрического поля решётки зависит от температуры, и с повышением температуры частота ЯКР понижается.