

Методы измерения физических величин

Измерение температуры.

Программа курса.

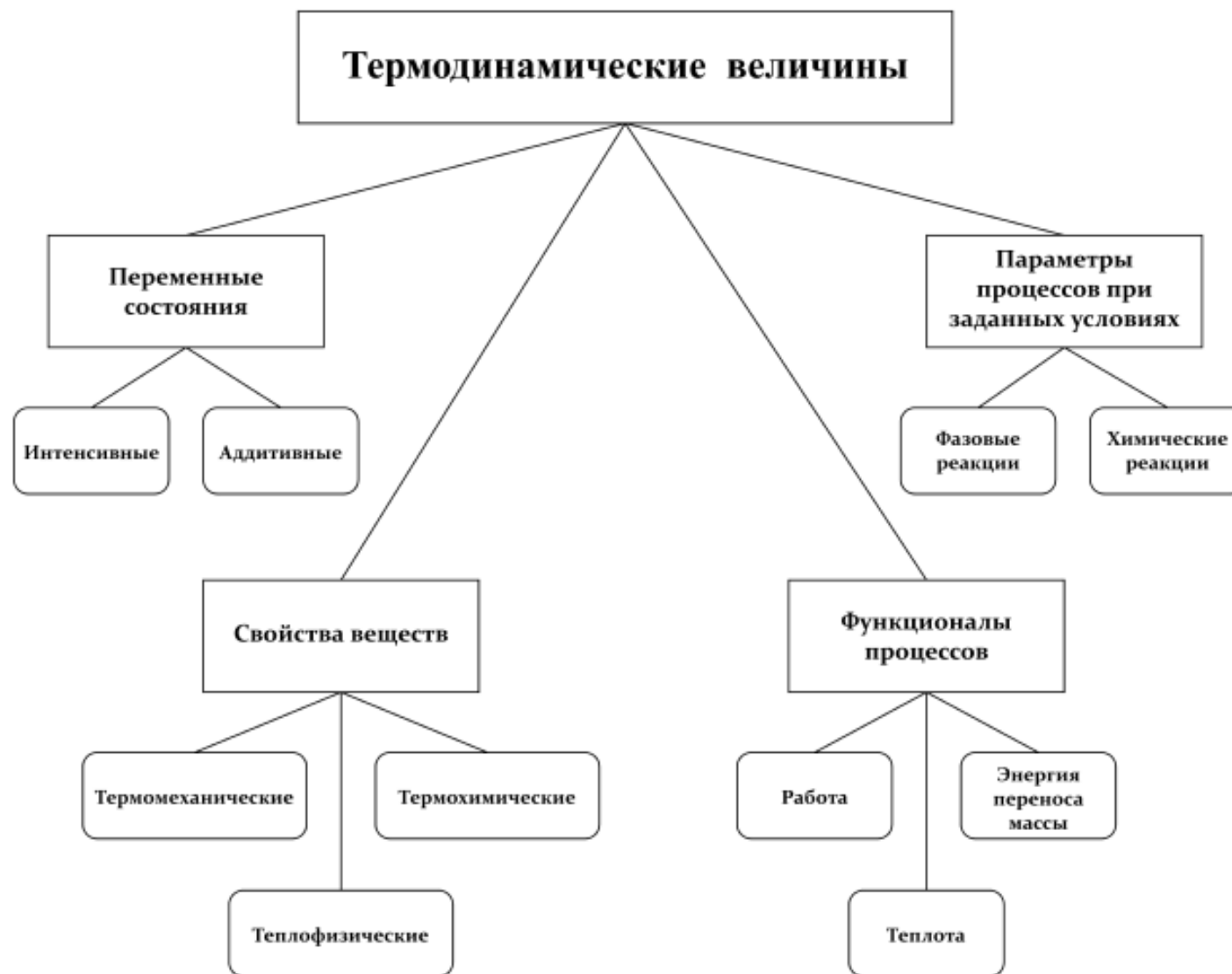
1. Основные определения. Система единиц.
2. Система единиц СИ и фундаментальные физические константы. Универсальные постоянные и естественные системы единиц. Производные единицы и стандарты. Физические пределы точности измерений.
3. Методы измерения термодинамических величин.
4. Электромагнитные измерения. Стандарты частоты.
5. Радиоспектроскопия (эффект Зеемана), ЯМР, томография.
6. Фундаментальные шумы в измерительных устройствах. Тепловой шум. Формула Найквиста. Теорема Каллена-Вельтона. Дробовой шум в электронных и оптических приборах.

<http://binp.lms-service.ru/course/view.php?id=27>

Программа курса.

8. Квантовые эффекты в физических измерениях
9. Квантовые эталоны единиц физических величин.
Эффект Джозефсона и сверхпроводящие квантовые интерферометры.
10. Диагностика плазмы.

Классификация термодинамических величин (Лекция 3)



Переменные состояния (Лекция 3)

- › Под **состоянием** термодинамической системы понимают совокупность её свойств.
- › К **переменным состояниям** относятся, например,
 - температура,
 - давление,
 - концентрации составляющих систему веществ,
 - объём,
 - массы составляющих систему веществ,
 - химические потенциалы составляющих веществ (μ),
 - энтропия (S),
 - термодинамические потенциалы (U, H, F, G)
 - характеристические функции.

История понятия температуры

- › Понятие температуры возникло ещё в древности из интуитивного ощущения «тёплого» и «холодного» состояний окружающих нас предметов. Эти ощущения связаны с тем, отдаёт ли живая ткань тепло или получает его.
- ›
- › В средние века учёные считали, что в более нагретых телах содержится большее количество особого вещества — теплорода, чем в менее нагретых. Поэтому температура воспринималась как крепость смеси вещества тела и теплорода. По этой причине единицы измерения крепости спиртных напитков и температуры называются одинаково — *градусами*.

Определение температуры

Температура – это физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

Температура – это единственный термодинамический параметр, который одинаков для всех частей изолированной системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия.

В отличие от других физ. Величин, таких как длина, время и т.д., температура не обладает свойством аддитивности и для её измерения нельзя ввести эталон. Измерение температуры осуществляется на основании уравнений состояния связывающих температуру с другими параметрами: объёмом, давлением и др.

Термодинамическое определение температуры

- › С точки зрения термодинамики температура это физическая величина, определяемая, как параметр состояния термодинамического равновесия макроскопических систем. В соответствии с вторым законом термодинамики температура определяется соотношением:

$$T = \frac{dU}{dS}, \text{ где } U \text{ – внутренняя энергия системы}$$

- › Такая температура всегда положительна и её называют *абсолютной* температурой по термодинамической шкале.
- › За единицу измерения принят Кельвин, который равен изменению температуры, которое приводит к изменению энергии, приходящейся на одну степень свободы kT , равную $1,380\ 649 \cdot 10^{-23}$ Дж.

Термодинамическое определение температуры

- › Термодинамическая шкала была введена У. Томсоном на основании *теоремы Карно*, таким образом, чтобы в её пределах эффективность идеальной тепловой машины была одинаковой.
- › Для определения *температуры* можно воспользоваться любым точным термодинамическим соотношением, в которое помимо температуры входят, только экспериментально измеримые величины:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$$

Молекулярно-кинетическое определение температуры

- › В молекулярно-кинетической теории температура определяется как величина, характеризующая приходящуюся на одну степень свободы среднюю кинетическую энергию частиц макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия.
- › В случае идеального газа в равновесных условиях:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{m \langle \mathbf{V}^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT \quad \Rightarrow \quad T = \frac{m}{3k} \langle \mathbf{V}^2 \rangle$$

т.е. температура пропорциональна средней кинетической энергии частиц.

Молекулярно-кинетическое определение температуры

- › На большом адронном коллайдере при столкновении ядер свинца с кинетической энергией 5ТэВ эквивалентная температура составляет около 100 триллионов градусов.

Статистическое определение температуры

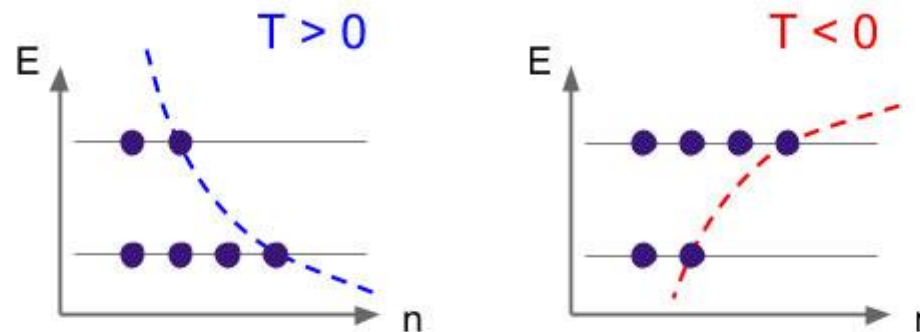
› В статистической физике температура определяется как производная от энергии системы по её энтропии:

$$T = \frac{dE}{dS} \quad \text{при этом} \quad S = k_B \log \Omega$$

Ω – число микроскопических конфигураций системы

Отрицательная температура

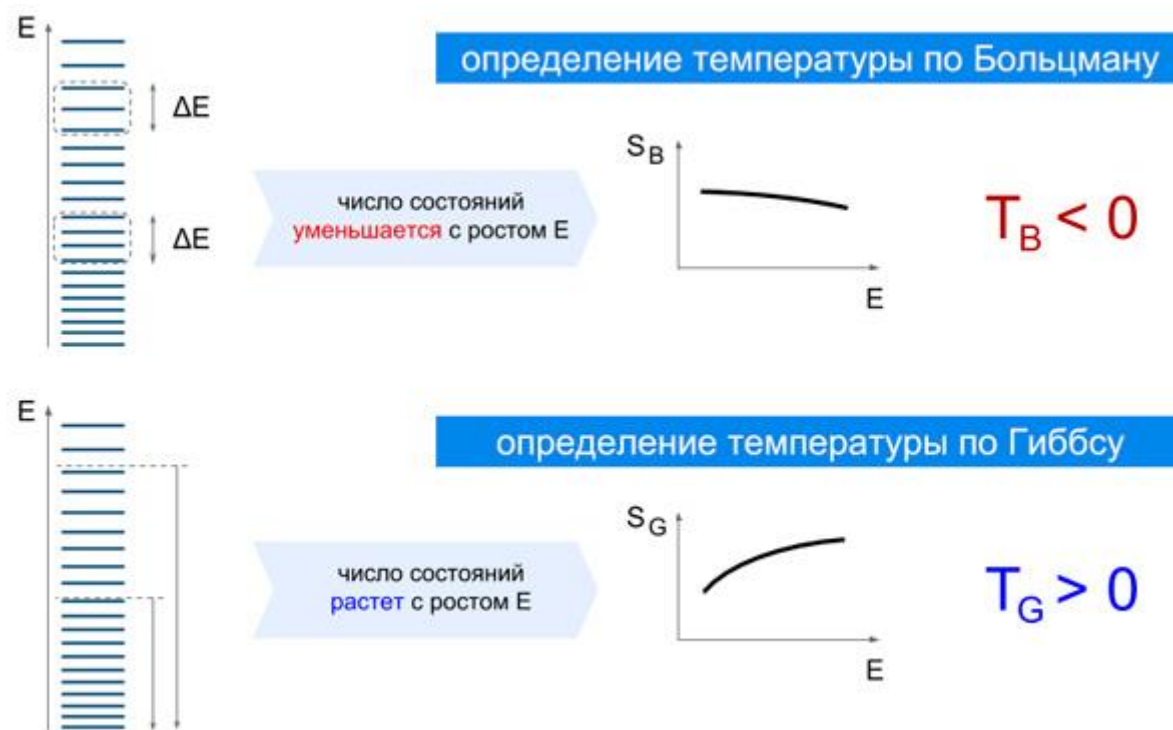
- › **Отрицательная абсолютная температура** — температура, характеризующая равновесные состояния термодинамической системы, в которых вероятность обнаружить систему в микросостоянии с более высокой энергией выше, чем в микросостоянии с более низкой. Как пример такой системы можно привести рабочее тело лазера, где существует инверсная заселённость уровней. [1]



$$N \sim \exp(-E/kT)$$



Отрицательная температура



Два определения энтропии — по Больцману и по Гиббсу — могут давать сильно разные результаты для соответствующих температур. Рассмотрим систему, у которой плотность энергетических уровней уменьшается с ростом энергии. Энтропия по Больцману (S_B) — это логарифм от количества уровней внутри небольшого интервала ΔE . Энтропия по Гиббсу (S_G) — это логарифм от полного числа уровней ниже данной энергии. Для изображенной системы S_B уменьшается с ростом энергии, а S_G — растет. Поэтому температура по Больцману получается отрицательной, а по Гиббсу — положительной

Отрицательная температура

- › Для всех реальных ситуаций эти две термодинамики настолько близки, что их различить просто нереально. Поэтому в большинстве учебников по статистической физике и термодинамике этого различия вообще не проводится, а в качестве опоры выбирается термодинамика по Больцману. Но если соответствующую температуру T_B использовать в некоторых экзотических ситуациях, то она действительно может принимать отрицательное значение.
- › Зато определение температуры по Гиббсу, T_G , остается осмысленным всегда, даже в тех экзотических ситуациях, где применимость термодинамики спорна. При повышении средней энергии температура плавно растет, но никогда не становится бесконечной и не прыгает потом в отрицательные значения.

Отрицательная температура

- › В рамках строгой термодинамики требуется, чтобы термодинамическая температура была всегда положительна. Поэтому то определение, которое приводит к отрицательным значениям, — это **ненастоящая температура**. Ею можно пользоваться, никто этого не запрещает, но ее нельзя подставлять в настоящие термодинамические формулы или придавать ей излишне физическое значение.

Единицы и шкалы измерения температуры

› Шкала Реомюра

Предложена в 1730 году Рене Реомюром, который описал изобретённый им спиртовой термометр.

Реомюр предложил в качестве опорных точек температуры таяния льда и кипения **спирта!** ($\sim 78^\circ\text{C}$).

Один градус Реомюра соответствовал расширению спирта на $1/1000$ объёма. Но многие ошибочно предполагали, что 80°Ré соответствует температуре кипения воды. Поэтому в последствии, после изобретения ртутного градусника, шкала была переопределена как:

Единица — градус Реомюра ($^\circ\text{Ré}$), 1°Ré равен $1/80$ части температурного интервала между опорными точками — температурой таяния льда (0°Ré) и кипения воды (80°Ré)

$$1^\circ\text{Ré} = 1,25^\circ\text{C}$$

Единицы и шкалы измерения температуры

› Шкала Фаренгейта

Предложена в 1724 году немецким физиком Габриэлем Фаренгейтом. Опорными точками были выбраны температура «замораживающей» смеси (лёд, вода и хлорид аммония NH_4Cl), равная 0°F или -17.78°C и температура человеческого тела - $+37^\circ\text{C}$ или $+96^\circ\text{F}$.

В настоящее время опорными точками шкалы Фаренгейта являются температура таяния водяного льда - $+32^\circ\text{F}$ и температура кипения воды — $+212^\circ\text{F}$.

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

Единицы и шкалы измерения температуры

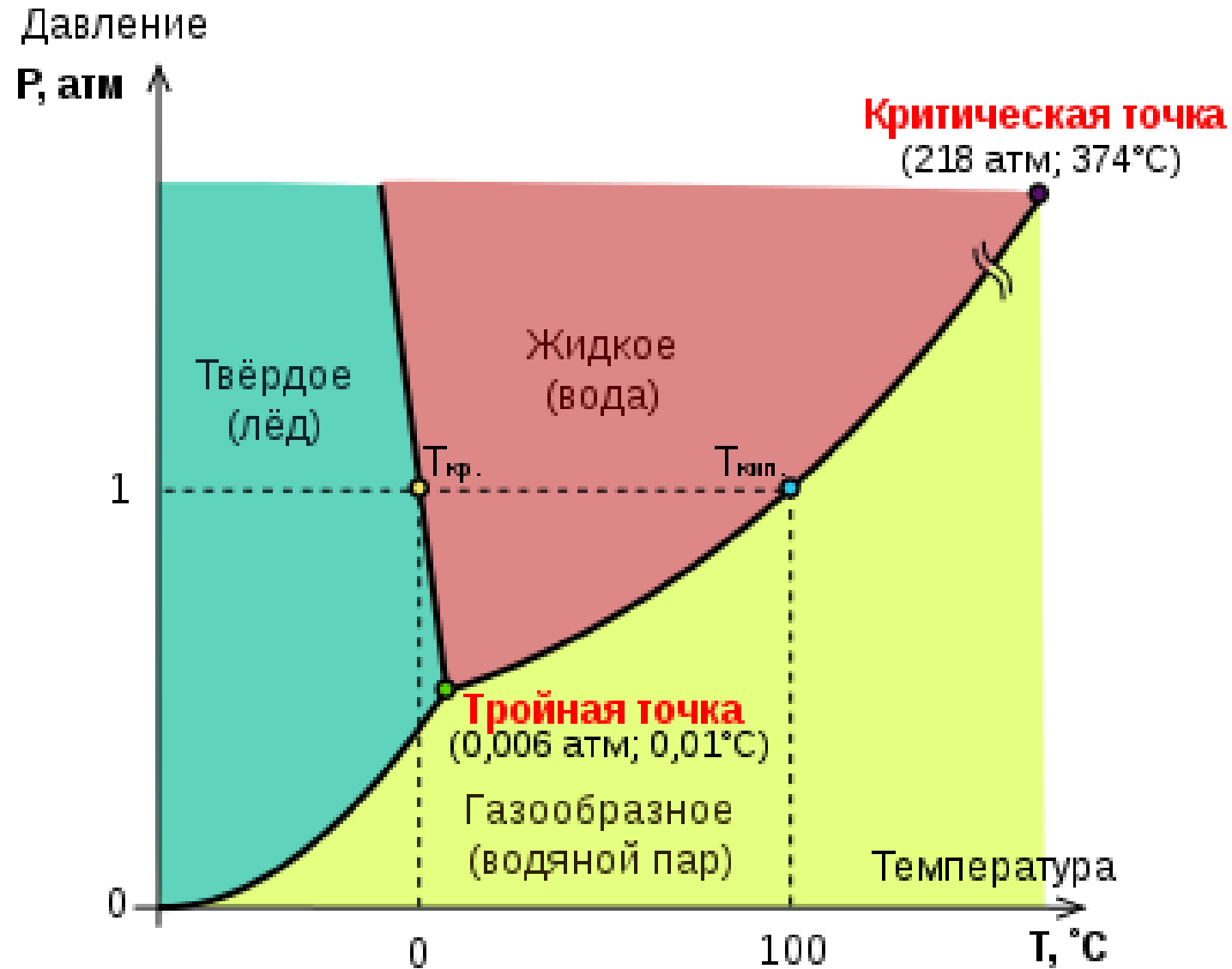
› Шкала Цельсия

Была предложена в 1742 году шведским учёным Андерсом Цельсием. Первоначально в ней за ноль была принята точка кипения воды, а за $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ — температура замерзания воды. Позже шкалу перевернули и она используется в таком виде до настоящего времени.

Первоначальное определение градуса Цельсия зависело от определения стандартного атмосферного давления, поэтому согласно современному определению, градус Цельсия равен одному кельвину (К), а ноль шкалы Цельсия установлен таким образом, что температура тройной точки воды равна $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$



Единицы и шкалы измерения температуры



Единицы и шкалы измерения температуры

› Шкала Кельвина

Предложена в 1848 Уильямом Томсоном (лордом Кельвином) году как температурная шкала, нулевая точка которой будет соответствовать предельной степени холода (абсолютному нулю), а ценой деления является градус Цельсия.

В 1967г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам установила: 1 кельвин составляет $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды

На XXVI ГКМВ принято, что кельвин равен изменению температуры, которое приводит к изменению энергии, приходящейся на одну степень свободы kT , то есть $1,380\ 649 \cdot 10^{-23}$ Дж.

Температура тройной точки воды остаётся равной 273,16 К, но при этом её значение приобретает погрешность и в дальнейшем будет определяться экспериментально.

Международная температурная шкала (МТШ-90)

- › Шкала МТШ-90 является наиболее близкой на настоящий момент возможной аппроксимацией термодинамической температурной шкалы.
- › Близость аппроксимации в основном определяется точностью измерения термодинамических температур реперных точек – фазовых переходов чистых веществ.
- › Если в период утверждения первых шкал наиболее точные эксперименты в диапазоне средних температур проводились с помощью газовых термометров, то в настоящее время получила развитие акустическая термометрия, абсолютная радиационная термометрия, шумовая термометрия и другие методы.

Реперные точки МТШ-90

Реперная точка		T ₉₀ /K	t ₉₀ /°C
He	Давление паров	3-5	-270,15-268,15
e-H ₂	Тройная точка	13.8033	-259.3467
e-H ₂	Давление паров	≈17	≈ -256.15
e-H ₂	Давление паров	≈20.3	≈ -252.85
Ne	Тройная точка	24.5561	-248.5939
O ₂	Тройная точка	54.3584	-218.7916
Ar	Тройная точка	83.8058	-189.3442
Hg	Тройная точка	234.3156	-38.8344
H ₂ 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
Ag	Точка затвердевания	1234.93	961.78
Au	Точка затвердевания	1337.33	1064.18
Cu	Точка затвердевания	1357.77	1084.62

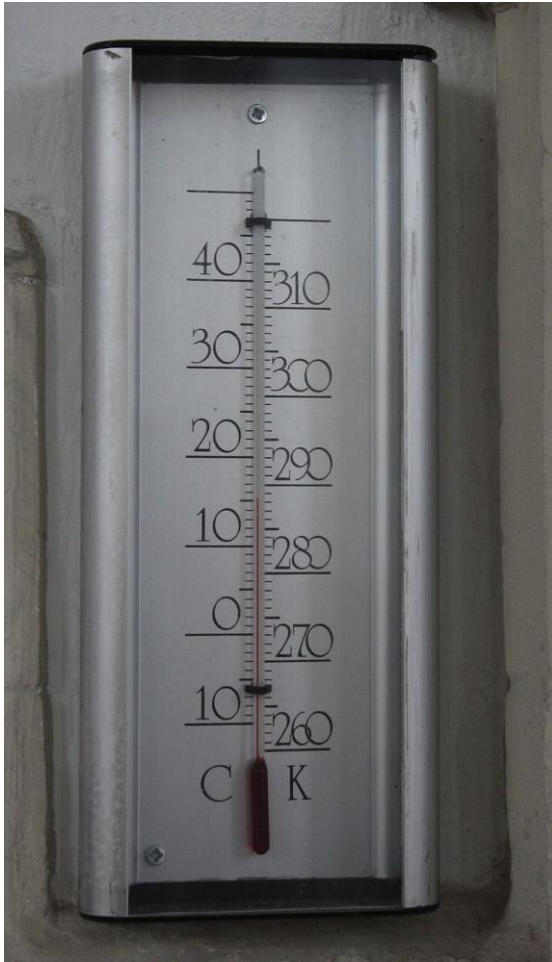
Вторичные реперные точки МТШ-90

Реперная точка	Температура, °С	Воспроизводимость, °С
Точка кипения азота	-195,798	0,002
Точка сублимации двуокси углерода	-78.464	0.003
Точка плавления эвтектики Ga/20.5%In	15.650	0.001
Точка плавления эвтектики Ga/8%Sn	20.476	0.002
Точка затвердевания натрия	97,794	0.005
Точка кипения воды	99,974	0,001
Точка затвердевания бензойной кислоты	122,352	0.007
Точка затвердевания висмута	271,402	0,001
Точка затвердевания кадмия	321,069	0,001
Точка затвердевания свинца	327,462	0,001
Точка кипения серы	444,614	0.002
Точка затвердевания сурьмы	630,628	0,001
Точка плавления эвтектики Cu/71.9%Ag	779.63	0.05
Точка кипения натрия	882,940	0.005
Точка затвердевания никеля	1455	1
Точка затвердевания кобальта	1495	3
Точка затвердевания палладия	1554,8	0.1
Точка затвердевания платины	1768,2	0.4
Точка затвердевания родия	1963	3
Точка плавления оксида алюминия	2053	2
Точка затвердевания иридия	2446	6
Точка плавления молибдена	2622	4
Точка плавления вольфрама	3414	7

Методы и средства измерения температуры

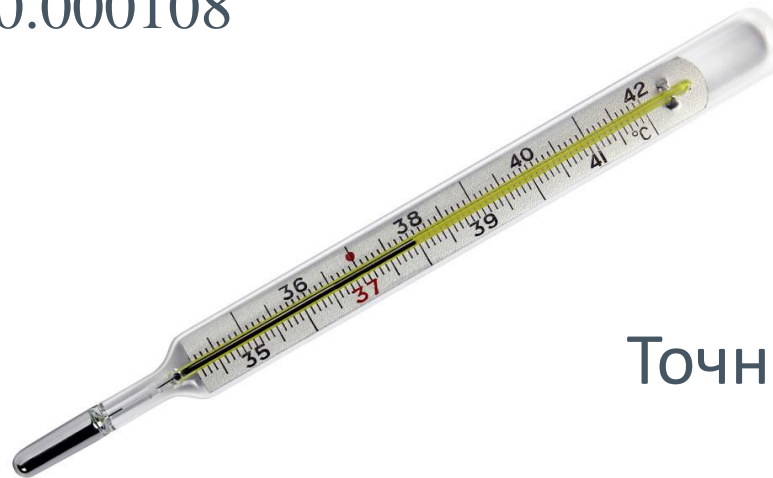
- › Методы и средства измерения температуры принято делить на две большие группы – контактные и бесконтактные:
 - контактным методам относятся термометры расширения (ртутные, спиртовые и др.), а также биметаллические и дилатометрические термометры, термопарные датчики, терморезистивные преобразователи, световодные датчики.
 - к группе бесконтактных измерителей температуры относятся пирометры и термометры излучения.

Жидкостные термометры расширения



Спиртовые термометры предназначены для измерения температур от -100 до 50 °С, ртутные термометры от -38 до 500 °С.

Для точных термометров необходима поправка: $\Delta t = \alpha h_{\text{в}}(t_{\text{и}} - t_{\text{о}})$,
Для ртути $\alpha = 0.00016$, для этилового спирта $\alpha = 0.000108$



Точность 0.1 °С

Жидкостные термометры расширения

- › Ртутные термометры запрещены в России с 2014 (не ратифицировано) года согласно Минаматской конвенции (2013).
- › В качестве замены ртути предложен галинстан или ингас –сплав $\text{In}(21.5\%)\text{-Ga}(68.5\%)\text{-Sn}(10\%)$. Температура плавления $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипения $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- › В отличии от ртути смачивает стекло.

Биметаллические (дилатометрические) термометры

Спиральный



Пружинный

Точность около 1°C при температурах около 0°C ,
ухудшается до 10°C при температурах $400-600^{\circ}\text{C}$

Газотермические методы и средства измерения температуры

- › Газотермическая температура определяется из уравнения состояния:

$$PV = \nu RT$$

- › Поскольку в термометре используется реальный газ, надо использовать уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a\nu^2}{V^2} \right) (V - b\nu) = \nu RT$$

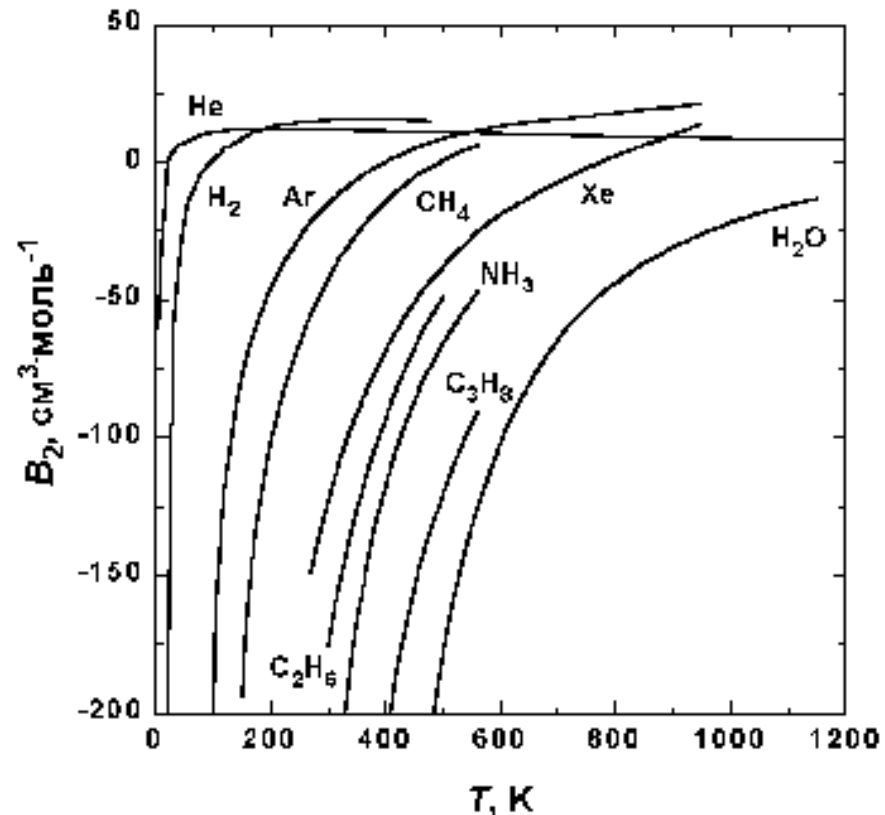
его можно разложить в ряд $pV = \nu RT \left(1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \dots \right)$

- *вириальное разложение*

Вириальные коэффициенты

π

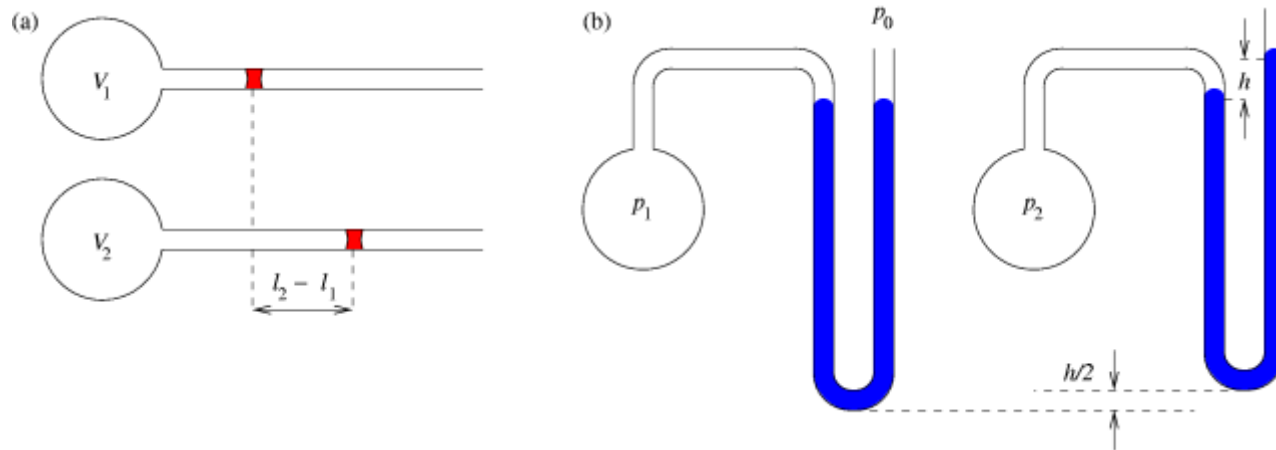
Вириальные коэффициенты B , C ... характеризуют взаимодействие между молекулами в системе и в общем случае зависят от температуры.



Второй вириальный коэффициент для различных газов

Газовые термометры

- › Как правило в газовых термометрах используют гелий или водород.
- › Измеряемая температура равна $T = 273.15 \cdot (P/P_0)$
- › В шкале учитываются поправки на неидеальность газа.



Два варианта газовых термометров:
 постоянного давления и постоянного объёма.

Газовые термометры

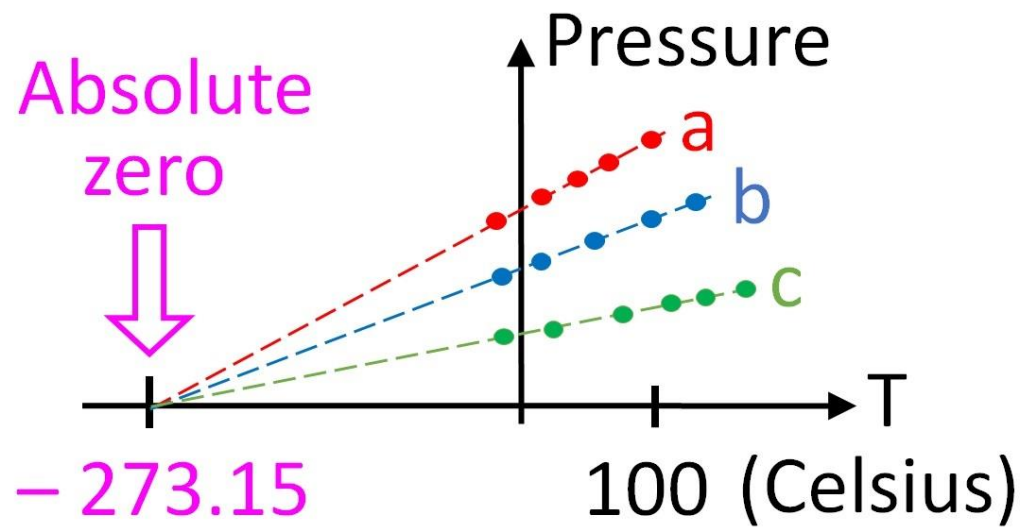
Газовые термометры применяются в очень широком диапазоне температур – 2 до 1500 К.

Абсолютная погрешность может достигать $3 \cdot 10^{-3}$ К.

Газовые термометры постоянного давления вышли из употребления.

При низких и умеренных температурах в качестве рабочего тела применяют гелий и водород, при высоких (до 1500 К) – азот.

Газовые термометры постоянного объёма



Акустический термометр

- › Скорость звука в идеальном газе зависит от температуры как:

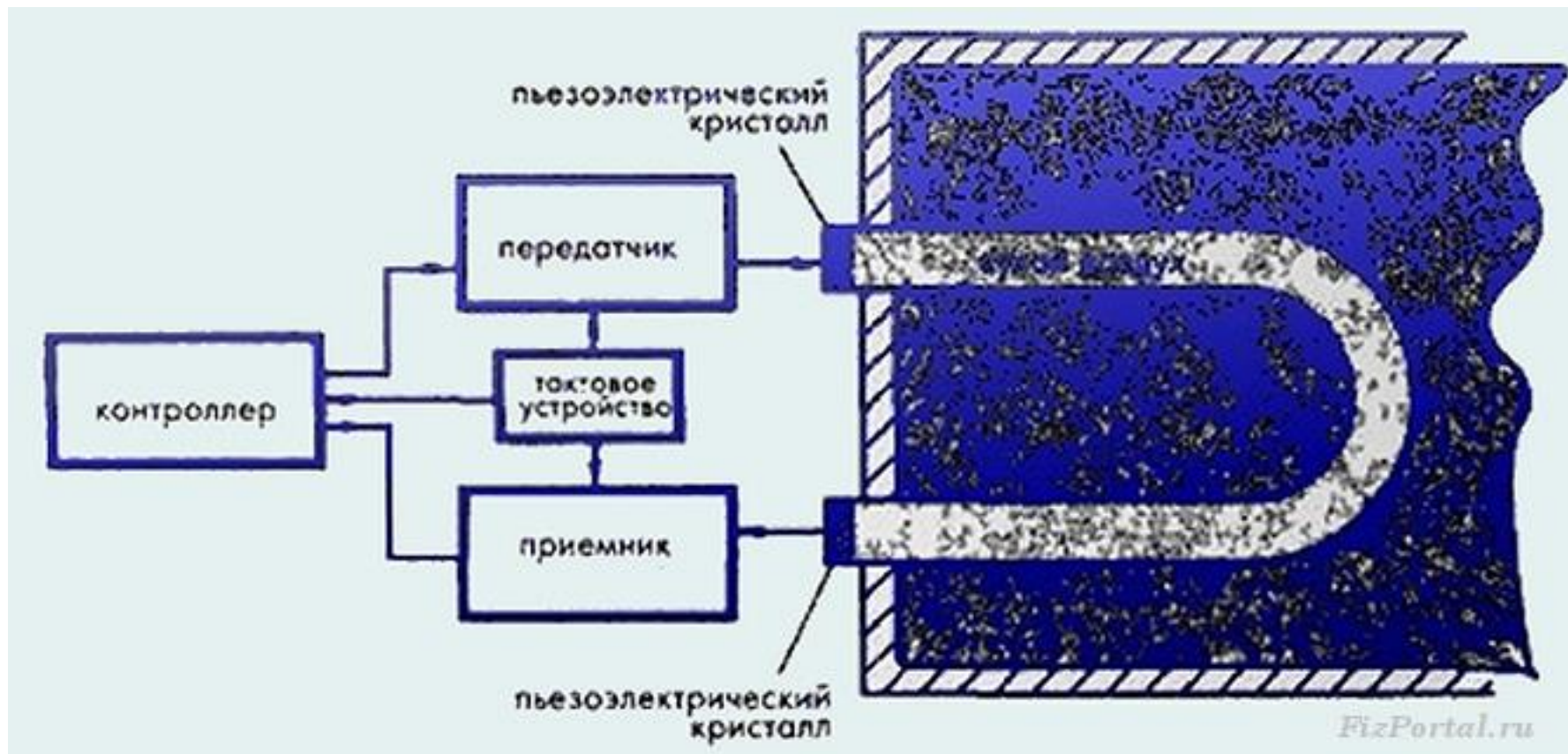
$$c_0 = \sqrt{\frac{C_P}{C_V} \frac{RT}{\mu}}$$

где C_P, C_V – теплоёмкости при постоянном давлении и объёме, μ – молярная масса.

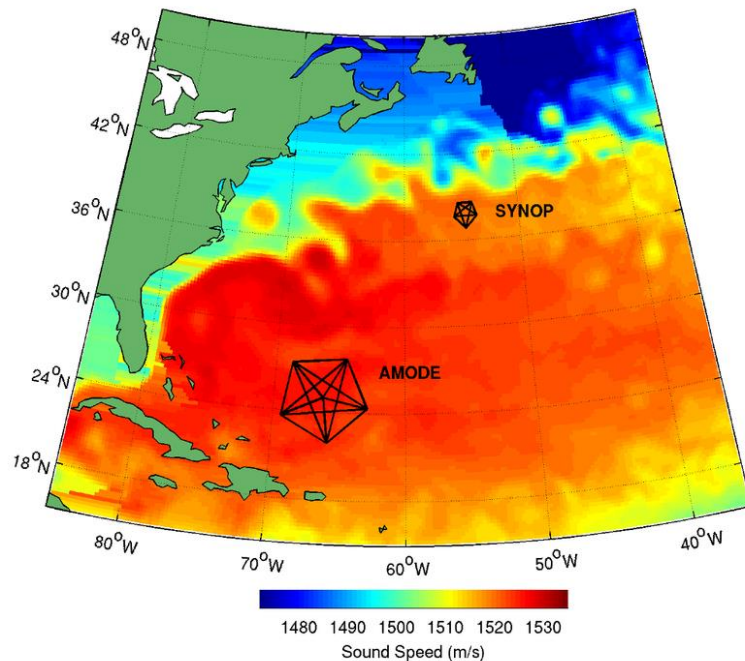
- › В реальном газе необходимо учитывать поправку:

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{B(T)}{V_m} + \dots}$$

Акустический термометр



Океанская акустическая томография



Океанская акустическая томография это метод исследования трёхмерного распределения температуры в океане по изменению скорости звука. Изменение температуры воды на 1 °C соответствует изменению скорости звука в воде примерно на 4 м/с.

Акустический термометр

- › По сравнению с газовым термометром обладает на порядок более низкой точностью по сравнению с газовым термометром.
- › Используется в основном для измерения температуры в диапазоне 2 - 20 К.

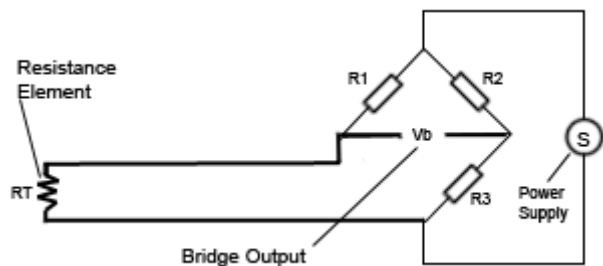
Металлические термометры сопротивления

- › Зависимость электросопротивления у металлов описывается формулой:

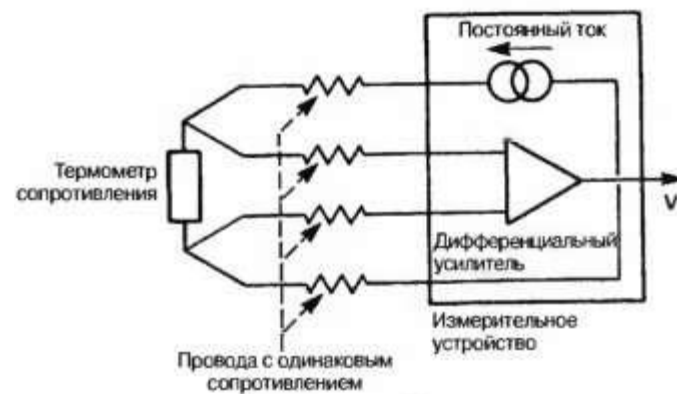
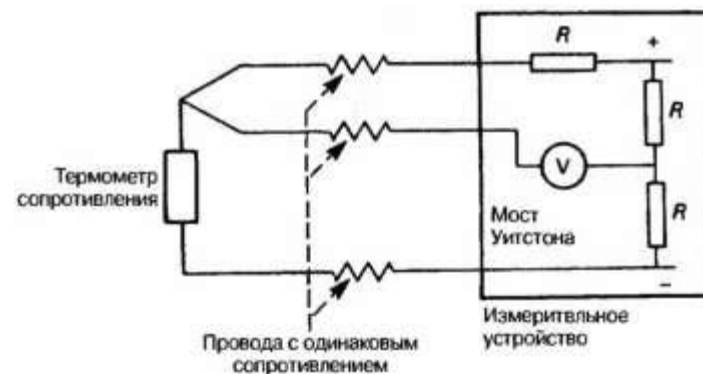
$$R(T) = R(T_0) \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \dots \right]$$

- › Вклад квадратичного члена достаточно велик, поэтому диапазон измерений не очень большой.
- › Для платины $\alpha = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$, $\gamma = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$.

Схемы включения термометров сопротивления



Двух-, трех- и четырёхпроводные схемы включения термометров сопротивления. Наиболее часто используется трёхпроводная схема.



Полупроводниковые термометры сопротивления

- › Обладают более высокой чувствительностью по сравнению с металлическими.
- › Сопротивление полупроводников падает нелинейно с ростом температуры:

$$R_t = AT^b e^{B/T}$$

Где A , b , B – постоянные коэффициенты.

- › Из зависимости сопротивления видно что с уменьшением T , чувствительность термометра повышается.
- › В основном используются для измерения низких температур. Диапазон от 4 до 500 К.

Термометры сопротивления



Преимущества и недостатки

› Преимущества термометров сопротивления

- Высокая точность измерений (обычно лучше ± 1 °С), может достигать до 0,13 тысячных °С (0,013).
- Возможность исключения влияния изменения сопротивления линий связи на результат измерения при использовании 3- или 4-проводной схемы измерений.
- Практически линейная характеристика (при сравнительно невысоких температурах).

› Недостатки термометров сопротивления

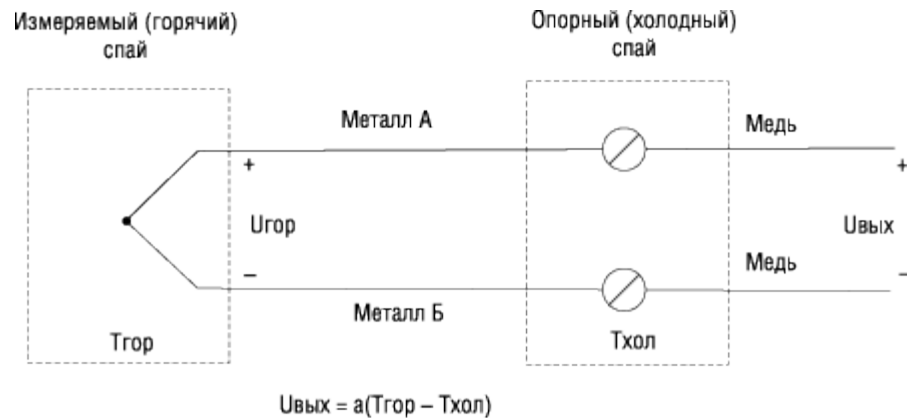
- Относительно малый диапазон измерений (по сравнению с термопарами)
- Дороговизна (в сравнении с термопарами из неблагородных металлов, для платиновых термометров сопротивления типа ТСП).
- Требуется дополнительный источник питания для задания тока через датчик.

Термоэлектрические методы измерения температуры

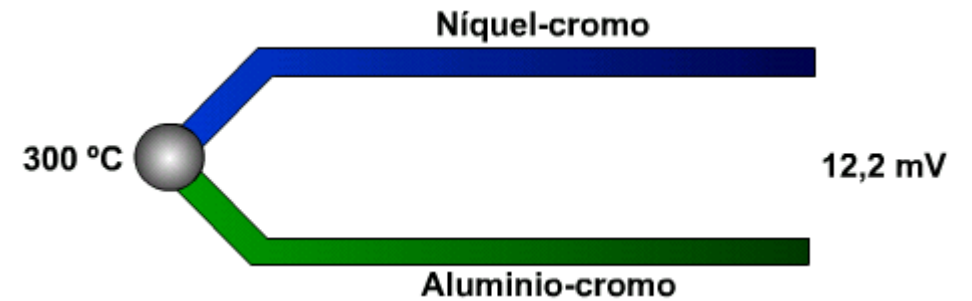
- › Основаны на эффекте Зеебека, состоящего в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает термо-ЭДС, если места контактов поддерживают при разных температурах: $E = \alpha_{12}(T_2 - T_1)$
- › Эффект состоит из нескольких компонент:
 - Объёмной разности потенциалов (поток электронов от горячего конца проводника к холодному).
 - Контактной разности потенциалов (разность энергий Ферми).
 - Фононного увлечения (поток фононов от горячего конца к холодному).
 - Магнонного увлечения (наблюдается в магнетиках).

Термопара

- › **Термопара** (термоэлектрический преобразователь) — устройство, применяемое для измерения температуры.



б)



Термопары

› Преимущества термопар

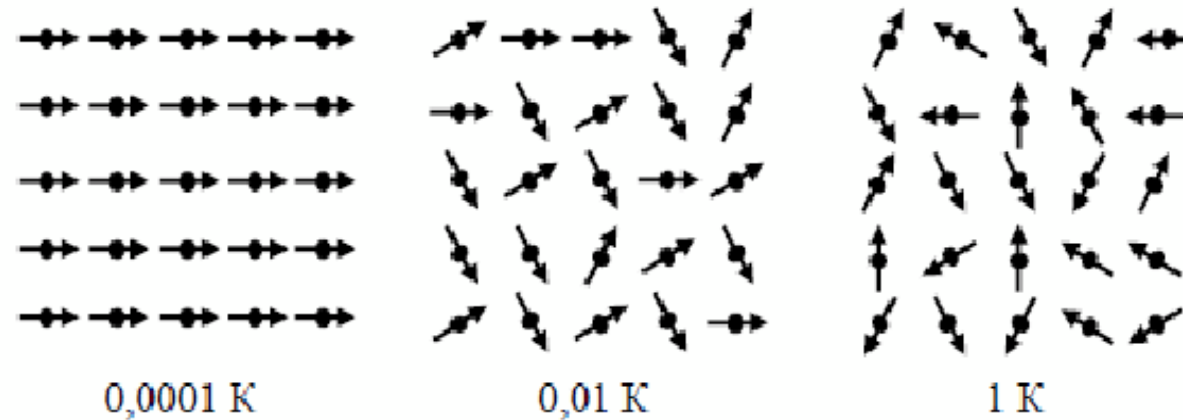
- Высокая точность измерения значений температуры (вплоть до $\pm 0,01$ °C).
- Большой температурный диапазон измерения: от -250 °C до $+2500$ °C.
- Простота.
- Дешевизна.
- Надёжность.

› Недостатки термопар

- Для получения высокой точности измерения температуры (до $\pm 0,01$ °C) требуется индивидуальная градуировка термопары.
- На показания влияет температура свободных концов, на которую необходимо вносить поправку.
- Эффект Пельтье (необходимо исключить протекание тока через термопару).
- Зависимость ТЭДС от температуры существенно нелинейна.
- На большой длине термопарных и удлинительных проводов может возникать эффект «антенны» для существующих электромагнитных полей.

Магнитометрические способы измерения температуры

- › Основан на изменении магнитной проницаемости парамагнитного образца от температуры.



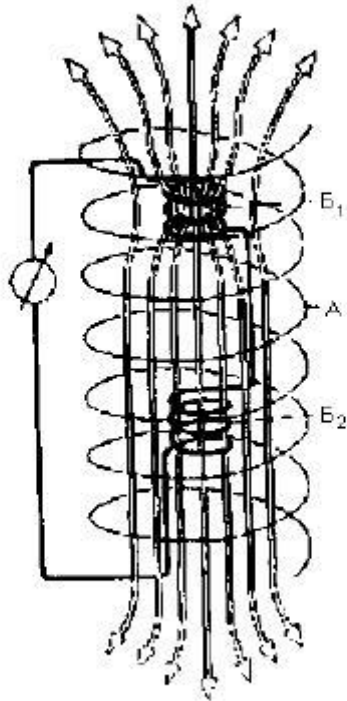
- › При температурах меньше 1 К магнитная восприимчивость χ описывается формулой

$$\chi = \frac{C}{T} \left(1 + \frac{C_1}{T} + \frac{C_2}{T^2} + \dots \right)$$

Термометр магнитной восприимчивости

- › Восприимчивость – намагниченность вызванная внешним магнитным полем.
- › Практически измеряется магнитная индукция внутри образца, вызванная внешним магнитным полем.
- › Для церий-магниевого нитрата магнитная восприимчивость возрастает в 80 раз при уменьшении температуры от 0.8 до 0.015 К.

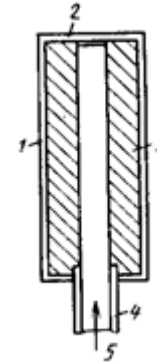
Схема установки



Катушка А создаёт внешнее магнитное поле, Катушки B_1 и B_2 включены встречно. В отсутствии образца гальванометр покажет нулевую ЭДС. Если в катушку поместить образцы, то отклонение стрелки гальванометра будет пропорционально магнитной восприимчивости образца.

Волоконно-оптический термометр

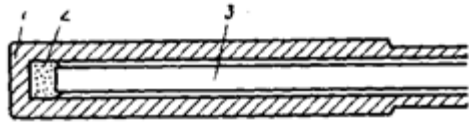
При изменении температуры среды, окружающей капилляр, изменяется температура масла в капилляре и увеличивается или уменьшается коэффициент преломления этой жидкости, что естественно приводит к изменению интенсивности света, вышедшего через торец сердцевины волокна и частично возвратившегося в эту сердцевину после отражения от «донышка» капилляра. В интервале температур 33-45°C имеет точность 0.1°C



*1 – капилляр, 2 –
отражающая поверхность, 3
– жидкость с
коэффициентом
преломления, зависящим от
температуры, 4 – оболочка
волокна, 5 – сердцевина
волокна.*

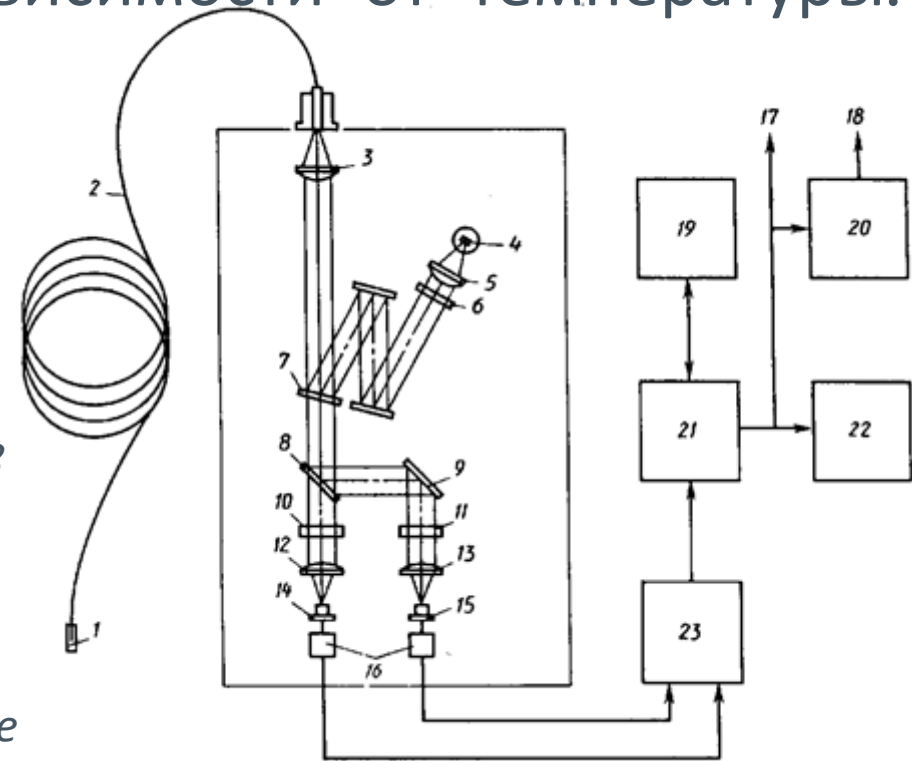
Флуорооптические термометр

Принцип действия основан на измерении интенсивности флуоресценции фосфора в зависимости от температуры.



1 – капсула, 2 –
флуоресцирующее вещество,
3 – кварцевый волоконный
световод.

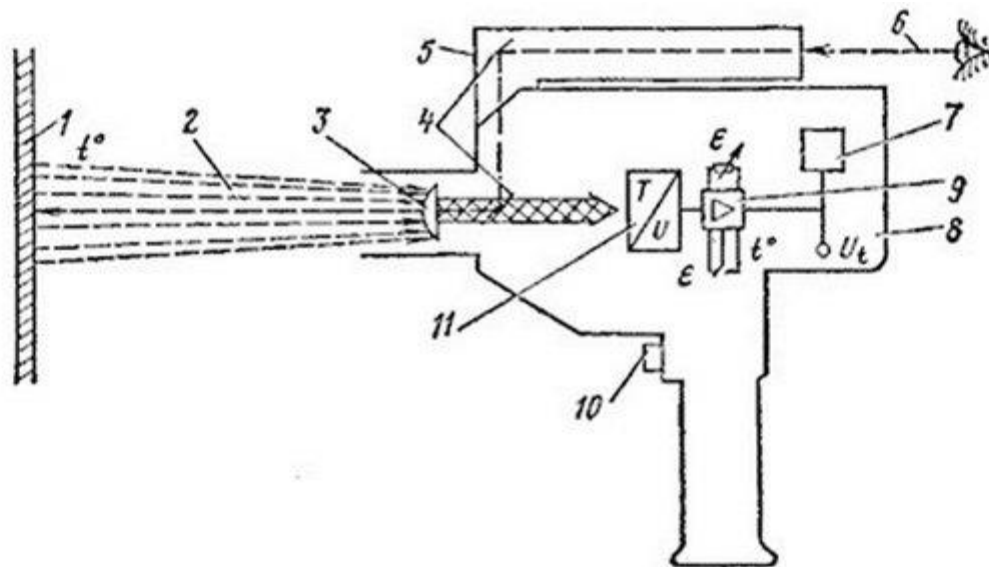
1 – датчик, 2 – волоконный световод, 3, 5, 12, 13 – линзы, 4 – галогенная лампа, 6, 10, 11 – фильтры, 7 – полупрозрачное зеркало, 8 – делитель пучка, 9 – зеркало, 14, 15 – детекторы, 16 – предварительные усилители, 17 – цифровой выход, 18 – аналоговый выход, 19 – запоминающее устройство, 20 – цифроаналоговый преобразователь, 21 – микропроцессор, 22 – дисплей, 23 – аналого – цифровой преобразователь.



Оптические методы измерения температуры

- › Предназначены для измерения температур свыше 200°C.
- › Принцип измерений основан на законе Стефана-Больцмана, который гласит, что: $E(T) = \sigma T^4$.

Радиационный термометр (пирометр)



Устройство пирометра: 1 — объект измерения; 2 — тепловое излучение;
 3 — оптическая система; 4 — зеркало; 5 — видоискатель; 6 — ось видоискателя;
 7 — измерительно-счетное устройство; 8 — корпус; 9 — электронный преобразователь; 10 —
 кнопка; 11 — датчик

Пирометр с исчезающей нитью

Накал нити регулируют так, что яркость свечения совпадает с яркостью объекта измерения. Для устранения погрешности от разных длин волн используют полосовой фильтр на 660 нм.

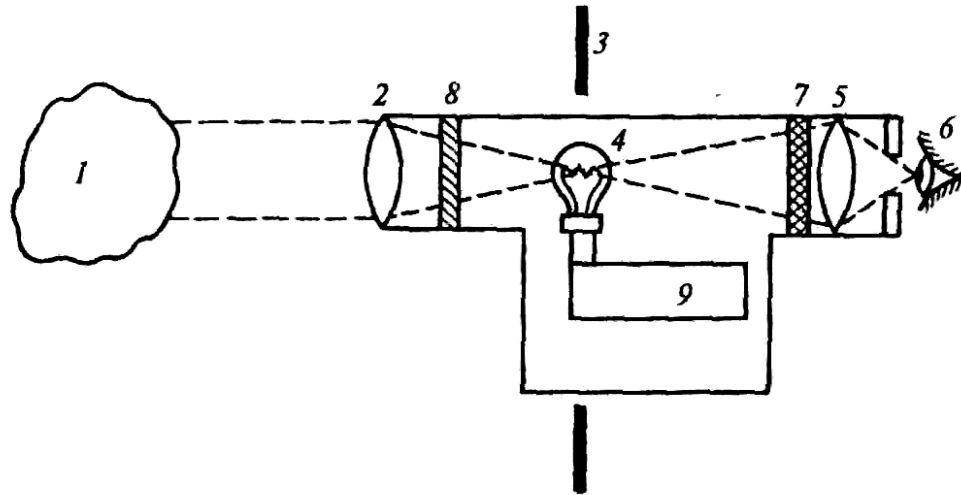


Рис. 9.2. Принципиальная схема квазимонохроматического пирометра с исчезающей нитью накала:

1 — объект измерения; 2 — объектив; 3 — плоскость фокусирования; 4 — пирометрическая лампа; 5 — окуляр; 6 — наблюдатель; 7 — красный светофильтр; 8 — поглощающее стекло; 9 — электронный блок

Основные характеристики

- › Диапазон измерений от 0°C до тысяч градусов.
- › Точность образцовых пирометров с исчезающей нитью доходит до долей кельвина.



Литература

- › 1. И. Иванов, Настоящая температура не может быть отрицательной. [Ссылка](#)
- › 2. В. М. Полунин, [Физические основы измерений](#), Курский госуниверситет, 2004