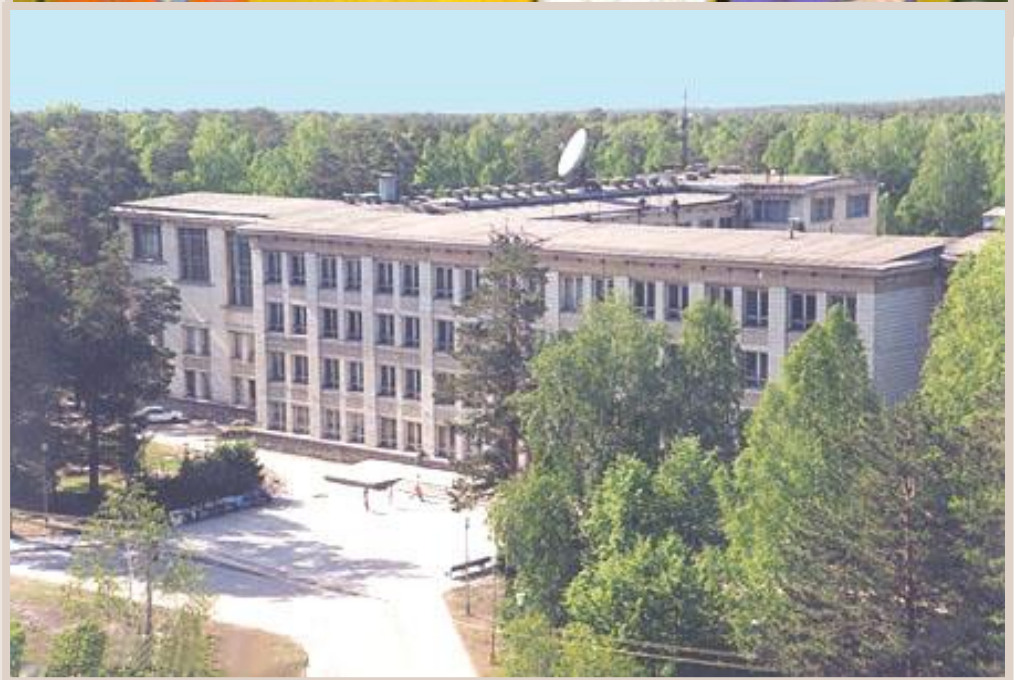
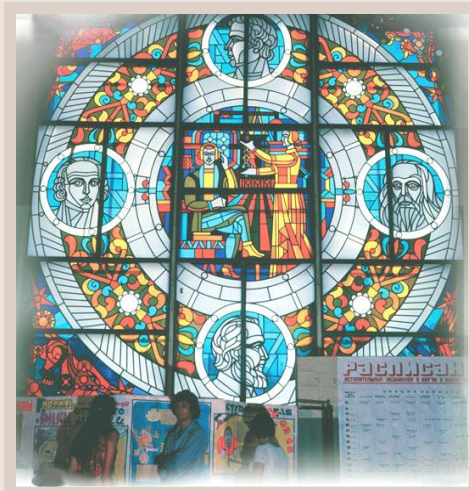


Novosibirsk State University



Термометрия

Температура

- Физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.
- Термодинамическое равновесие: состояние, в которое приходит самопроизвольно система в условиях изоляции от окружающей среды. (Прекращаются все необратимые процессы, связанные с диссипацией энергии – диффузия, теплопроводность, хим. Реакции и т.д..)
- В равновесных условиях темп. пропорциональна средней кинетической энергии частиц тела.
- Т. определяет: распределение частиц по уровням энергии, по скоростям, степень ионизации вещества, спектральную плотность излучения, полную объёмную плотность излучения.

ТЕРМОМЕТРИЯ, раздел физики, посвящённый методам и средствам измерения темп-ры. Одновременно Т.— раздел *метрологии*, в задачи к-рого входит обеспечение единства температурных измерений: установление *температурных шкал*, создание *эталонов*, разработка методик *градуировки* и *поверки* приборов для измерения темп-ры.

Темп-ра не может быть измерена непосредственно. Об изменении темп-ры судят по изменению других физ. св-в тел (объёма, давления, электрич. сопротивления, эдс, интенсивности излучения и др.), однозначно с ней связанных (т. н. термометрич. св-в). Любой метод измерения темп-ры связан с определением температурной шкалы.

Методы измерения темп-ры различны для разных диапазонов измеряемых темп-р, они зависят от условий измерений и требуемой точности. Их можно разделить на две осн. группы методов: контактные (собственно термометрия) и бесконтактные (Т. излучения, или *пирометрия*). Для контактных методов характерно то, что прибор, измеряющий темп-ру среды, должен находиться с ней в тепловом равновесии, т. е. иметь с ней одинаковую темп-ру. Осн. узлами всех приборов для измерения темп-ры являются чувствит. элемент, где реализуется термометрич. св-во, и связанный с ним измерит. прибор

Измерит. приборы, к-рыми определяют значения термометрич.св-ва (манометры, потенциометры, логометры, измерит. мосты, милливольтметры и т. д.), наз. вторичными приборами. Точность измерения темп-ры зависит от точности вторичных приборов, шкалы к-рых обычно градуированы в °С.

Температурные шкалы

- Это системы сопоставимых значений температуры.

При построении Т. ш. приписывают значение темп-ры t_1 и t_2 двум фиксированным температурным точкам $x=x_1$ и $x=x_2$, напр. точке плавления льда и точке кипения воды. Разность темп-р t_2-t_1 наз. основным температурным интервалом Т. ш. Считая произвольно, что связь между выбранным термометрич. св-вом x и t линейная, и полагая для удобства $t_1=0$, получаем для любого t по установленной т. о. эмпирической или условной Т. ш.

$$t = t_2 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}.$$

Т. ш. представляет собой, т. о., конкретную функциональную числовую связь темп-ры со значениями измеряемого термометрич. св-ва. Возможно неограниченное число Т. ш., различающихся по термометрич. св-ву, принятой зависимости $t(x)$ и темп-рам фиксированных точек. В простейшем случае Т. ш. различаются значениями t_1 и t_2 , принятыми для одинаковых физ. состояний. Так, в шкалах Цельсия $t^\circ\text{C}$, Реомюра $t^\circ\text{R}$ и Фаренгейта $t^\circ\text{F}$ точкам плавления льда и кипения воды при норм. давлении соответствуют разные значения темп-ры. Соотношение для пересчёта темп-ры из одной шкалы в другую: $t^\circ\text{C} = 1,25 t^\circ\text{R} = \frac{5}{9} (t^\circ\text{F} - 32)$.

Особенности температурных шкал

Шкала Фаренгейта была введена в 1714 г., опираясь на температуру таяния льда и температуру человеческого тела. Этот интервал был разделен на 64 части, а нулевая точка располагалась ниже точки таяния льда на 32 F. В то время это была наиболее низкая из известных температур и получалась она смешиванием нашатыря, воды и льда. Температура тела человека по этой шкале оказалась равной 96 °F, а точка кипения воды в шкале Фаренгейта равнялась 212 °F. Несмотря на всю архаичность такого определения температурной шкалы, ею пользуются во всем западном полушарии и в первую очередь в США.

В некоторых странах в настоящее время принята шкала Реомюра, введенная в 1730 г. В качестве опорных точек выбирается температура таяния льда (0°R) и точка кипения воды, которой приписывается температура 80°R . Такой выбор определяется тем, что выбранная Реомюром смесь для наполнения термометра, состоящая из смеси спирта с водой, между точками замерзания и кипения воды расширяется на 8%. Размер градуса в шкале Реомюра можно воспроизвести изменением объема водно-спиртовой смеси на 0,001 часть первоначального объема. В шкале Кельвина этот коэффициент объемного расширения соответствует приблизительно $1,25 \times 10^{-3}\text{K}^{-1}$.

Реперные точки. Эталоны.

- 1 – точка кипения воды в закрытом кипятильнике
- 2 – точка таяния льда
- 3 – тройная точка воды
- 4 – точка кипения серы
- 5 – точка кипения кислорода
- 6 – точка затвердевания серебра (золота)

Реперные точки.

Только при условии хорошей сходимости результатов измерений реперная точка вносится в список точек Международной практической температурной шкалы МПТШ. Последний раз шкала переутверждалась в 1990 г., и, соответственно, шкала называется МТШ-90.

Реперные точки шкалы МТШ-90 подразделяются на определяющие и вторичные.

Определяющие реперные точки - это наиболее точно измеренные относительно тройной точки воды температуры, для которых результаты измерений в различных странах хорошо совпадают между собой. Список определяющих реперных точек шкалы МТШ-90 дан в следующей таблице.

Вторичные реперные точки температурной шкалы охватывают более широкий диапазон температур. Самая высокая температура реперной точки - температура затвердевания вольфрама, равная 3660 К. Всего в шкале вторичных реперных точек содержится 27 значений, в основном температуры затвердевания чистых металлов. Результаты международных сличений температур этих реперных точек дали большее в сравнении с определяющими точками значения погрешностей. В основном причины расхождений заключаются в разной степени очистки веществ, которые используются в термостатах. Известно, что сверхчистые вещества имеют в ряде случаев удивительные свойства, отличные от свойств веществ, очищенных рутинными методами. Например, сверхчистое железо не окисляется, сверхчистый алюминий не покрывается окисной пленкой и блестит, как ртуть и т.д. Поскольку в разных странах чистые металлы получают из разного сырья, расхождения в температурах плавления и затвердевания многих металлов вполне объяснимы.

Определяющие реперные точки шкалы МТШ-90

Реперная точка	T, К	t°, С.	Погрешность, К
Тройная точка равновесного водорода	13,81	- 259,34	0,01
Точка кипения равновесного водорода при давлении 3330,6 Па	17,042	-256,108	0,01
Точка кипения равновесного водорода	20,28	- 252,87	0,01
Точка кипения неона	27,102	- 246,048	0,01
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789	0,01
Точка кипения кислорода	90,188	- 182,962	0,01
Тройная точка воды	273,16	0,01	Точно по определению
Точка кипения воды	373,15	100	0,005
Точка затвердевания цинка	692,73	419,58	0,003
Точка затвердевания серебра	1235,08	961,93	0,2
Точка затвердевания золота	1337,58	1064,43	0,2

Фазовые переходы

Вещество	$T_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	Вещество	$T_{\text{кип}}, \text{C}^\circ$
Водород	-252,6	Иод	184,35
Азот	-195,8	Глицерин	290,0
Аргон	-185,7	Серная	
Кислород	-182,98	кислота	ок. 300
Хлор	-34,1	Натрий	882,9
Ацетон	56,24	Цинк	906
Метиловый спирт	64,5	Алюминий	2500
Этиловый спирт	78,4	Медь	2540
Азотная кислота	82,6	Железо	2750
		Осмий	ок. 5000
		Тантал	ок. 5500

P=760
мм. рт. ст.

Начала термодинамики

Первое начало термодинамики: закон сохранения энергии для тепловых процессов. Изменение внутренней энергии газа равно количеству тепла, переданного газу, за исключением работы, совершенной газом.

$$dE = dQ - pdV$$

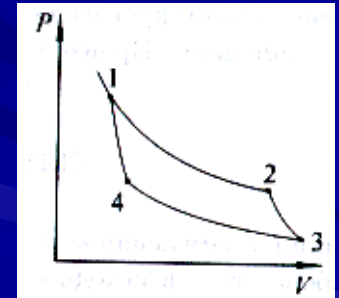
Второе начало термодинамики: невозможность создания вечного двигателя второго рода. При постоянной температуре нельзя извлечь тепло из его источника и превратить его в работу, не производя больше никаких изменений в заданной системе или окружающем пространстве.

Идеальная обратимая тепловая машина. Цикл Карно.



$$A = Q_H - Q_X$$

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H}$$



На P-V диаграмме цикл состоит из 2 изотерм и 2 адиабат

Термодинамическая температурная шкала

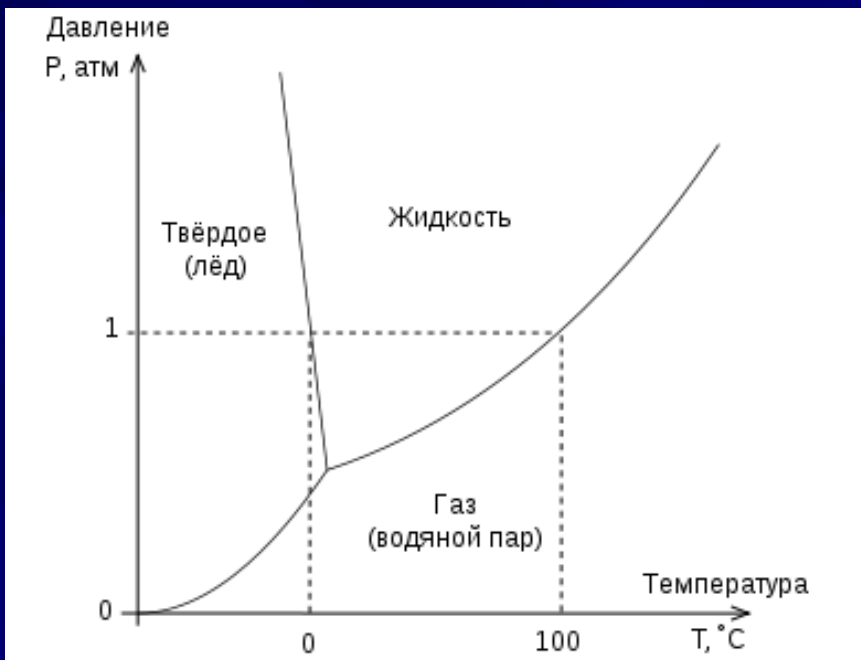
- Основана на втором начале термодинамики.

При определении термодинамич. Т. ш. исходят из *Карно цикла*. Если в цикле Карно тело, совершающее цикл, поглощает теплоту Q_1 при темп-ре T_1 и отдаёт теплоту Q_2 при темп-ре T_2 , то отношение $T_1/T_2 = Q_1/Q_2$ не зависит от св-ва рабочего тела и позволяет по доступным для измерений величинам Q_1 и Q_2 определять термодинамич. темп-ру.

Дополнит. преимущество термодинамич. Т. ш. в том, что определённые по ней темп-ры входят в ф-лы *термодинамики*, служащие основой всех теплофиз. расчётов. Для термодинамич. Т. ш., как и для любой другой, необходимо задать значения двух фиксированных темп-р. Общепринято считать $T_1=0$ при абс. нуле темп-ры, $T_2=273,15$ К в точке плавления льда при норм. давлении. Температура по термодинамич. Т. ш. измеряется в кельвинах (К). Введение $T_1=0$ явл. экстраполяцией и не требует реализации абс. нуля. Определённая т. о. термодинамическая, или абсолютная, Т. ш. (шкала Кельвина) имеет единицу темп-ры, совпадающую с таковой для стоградусной шкалы Цельсия, основанной на идеальном газе и значениях $t_1=0^\circ\text{C}$ (в точке плавления льда) и $t_2=100^\circ\text{C}$ (в точке кипения воды). Соотношение между темп-рами по шкалам Цельсия и Кельвина $T_K = t^\circ\text{C} + 273,15\text{K}$. В США

На практике при измерении темп-ры по термодинамич. Т. ш. применяют, как правило, не цикл Карно, а одно из строгих следствий второго начала термодинамики, связывающее удобно измеряемое термометрич. св-во с термодинамич. темп-рой. В числе таких соотношений: законы идеального газа, восприимчивость идеального парамагнетика, законы излучения абсолютно чёрного тела и т. д. В широком интервале темп-р, примерно от точки кипения гелия до точки затвердевания золота, наиболее точные измерения термодинамич. темп-ры обеспечивает *газовый термометр*.

Тройная точка ВОДЫ



Поскольку для начала отсчета термодинамической температуры существует _ абсолютный нуль, для установления единицы этой величины нужна только одна реперная точка. Такой точкой является тройная точка воды, т. е. такое состояние чистой воды, когда лёд, жидкая вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии. В условиях вакуума над тающим льдом устанавливается равновесное давление водяного пара, равное $P = 611$ Па ($4,58$ Торр). Этому состоянию приписано значение термодинамической температуры $T = 273,16$ К точно. Точка замерзания воды при нормальном атмосферном давлении ($p = 101325$ Па = 760 Торр = 1 атм.) расположена ниже тройной точки воды на $0,00993$ К. Единицей фундаментальной физической величины, термодинамической температуры, обозначаемой символом T , является кельвин, обозначение K , который по определению равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Таким образом, единица температуры оказывается в зависимости от качества производства тройной точки воды. Исследования последних лет показали, что на стабильность температуры тройной точки воды влияет состав стекла ампулы эталона, степень очистки воды и изотопный состав воды.

Эталон тройной точки воды

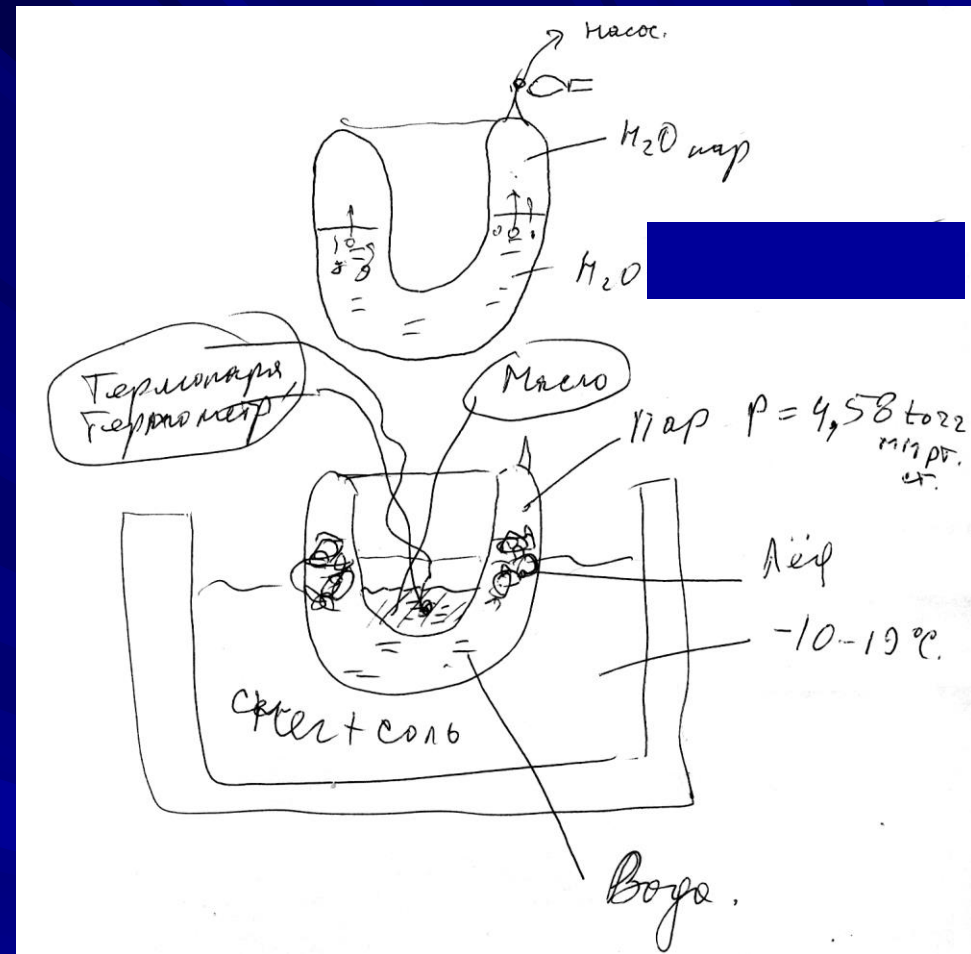
Сосуд, воспроизводящий тройную точку воды, аналогичен сосуду Дьюара, хорошо известному по применению в криогенной технике и в бытовых термосах. Отличия состоят в том, что стенки сосуда тройной точки воды не покрываются металлическим отражающим слоем, а между стенками сосуда налита примерно до половины объема чистая вода. При изготовлении тройной точки воду тщательно очищают многократной перегонкой и пропусканием через ионно-обменные смолы - поглотители примесей. Наполнив сосуд водой, ее вымораживают, а воздух между стенками тщательно откачивают. После откачки сосуд отпаивается.

Для того чтобы воспроизвести температуру тройной точки воды, стеклянный сосуд, изображенный на следующем рис., замораживают, например в холодильнике. Затем во внутреннюю часть сосуда помещают какой-либо нагретый предмет, чтобы лед между стенками начал таять. Это означает, что между стенками устанавливаются параметры, соответствующие одновременному наличию воды и льда при давлении насыщенных водяных паров, т. е. будет воспроизведена температура тройной точки воды.

Эталон тройной точки ВОДЫ

I – Изготовление эталона

II – Использование эталона



В итоге эталонные комплексы, воспроизводящие и передающие размер основной единицы термодинамической температуры системы СИ, представляют собой набор тройных точек воды, термометр (газовый), откалиброванный по тройной точке воды, и набор термостатов - реперных точек, воспроизводящих определяющие и вторичные реперные точки шкалы МПТШ-90.

На практике для точных измерений используются платиновые термометры сопротивления или платина - платинородиевые термопары, которые градуируются в конечном счете по реперным точкам.

Для обеспечения единства температурных измерений служит Гос. эталон единицы темп-ры *кельвина*, что позволяет в диапазоне 1,5—2800 К воспроизводить Междунар. практич. температурную шкалу (МПТШ-68). Путём сравнения с эталоном значения темп-р передаются образцовым приборам, по которым градуируются и проверяются рабочие приборы для измерений темп-р. Образцовыми приборами явл. германиевые (1,5—13,8 К) и платиновые [13,8—903,9 К (630,7°C)] термометры сопротивления, платинородий (90% Pt, 10% Rh) — платиновая термопара (630,7—1064,4 °C) и оптич. пирометр (выше 1064,4°C).

Температурные шкалы

- Цельсия -17,7 0 +100
- Фаренгейта 0 +32 +212
- Реомюра 0 +80
- Кельвина 0 +273,15 +373,15
- Ранкина 0 +492,3
- Формулы перехода между шкалами

$$T^{\circ}K = \frac{5}{9} T^{\circ}Ra$$

$$t^{\circ}C = 1,25 \cdot t^{\circ}R = \frac{5}{9} (t^{\circ}F - 32)$$

ТЕПЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

- Принцип действия основан на использовании тепловых процессов (нагрева, охлаждения, теплообмена), входной величиной которых является температура.
- Температура как параметр не поддается непосредственному измерению, но она непосредственно связана с внутренней энергией тел, и через нее с физическими свойствами.
- Физические явления:
 - 1. Тепловое расширение газов (водород, гелий, азот, воздух $\Delta T = 1 \div 10 \text{K}$); жидкостей ($\Delta T = 200 \div 1200 \text{K}$ — ртуть); твердых тел ($\Delta T = 200 \div 650 \text{K}$).
 - 2. Термо -ЭДС.
 - 3. Зависимость шумового напряжения $U_{\text{ш}}$ на резисторе от температуры ($\Delta T = 4 \div 1800 \text{K}$).
 - 4. Изменение модуля упругости пьезоэлектриков от температуры ($\Delta T = 10 \div 500 \text{K}$).
 - 5. Зависимость сопротивления от температуры.

ТЕРМОМЕТРЫ (от греч. *thérmē* — тепло и *metréō* — измеряю), приборы для измерения *температуры* посредством контакта с исследуемой средой. Первые Т. появились в кон. 16—нач. 17 вв. (термоскоп Г. Галилея, 1597; спиртовые флорентийские Т. и др.), сам термин «Т.» — в 1636.

Действие Т. осн. на разл. физ. явлениях, зависящих от темп-ры: на тепловом расширении жидкостей, газов и тв. тел, изменении с темп-рой давления газа или насыщ. паров, электрич. сопротивления, термоэдс, магн. восприимчивости парамагнетика

ЖИДКОСТНЫЙ ТЕРМОМЕТР, прибор для измерения *температуры*, основанный на тепловом расширении жидкости. Применяется в диапазоне темп-р от -200 до 750°C . Ж. т. представляет собой прозрачный стеклянный (редко кварцевый) резервуар с припаянным к нему капилляром (из того же материала). Шкала в $^{\circ}\text{C}$ наносится либо на толстостенный капилляр (т. н. палочный Ж. т.), либо на пластинку, жёстко соединённую с ним (Ж. т. с наружной шкалой). Ж. т. с вложенной шкалой (напр., медицинский) имеет внешний стеклянный (кварцевый) чехол. Шкалы имеют цену деления от 10 до $0,01^{\circ}\text{C}$. Термометрич. жидкость заполняет весь резервуар и часть капилляра.

В зависимости от диапазона измерений Ж. т. заполняют

пентаном (для измерения темп-р от -200 до 35°C), этиловым спиртом (от -80 до 70°C), керосином (от -20 до 300°C), ртутью (от -35 до 750°C) и др. Наиболее распространены ртутные Ж. т., т. к. ртуть остаётся жидкой в диапазоне темп-р от -38 до 356°C при норм. давлении и до 750°C при небольшом повышении давления (для чего капилляр заполняют азотом). Галлиевый Ж. т. позволяет измерять темп-ру в диапазоне от 30 до 1200°C . Ж. т. изготавливают из определ. сортов стекла и подвергают спец. термич.

Точность Ж. т. определяется ценой делений его шкалы.

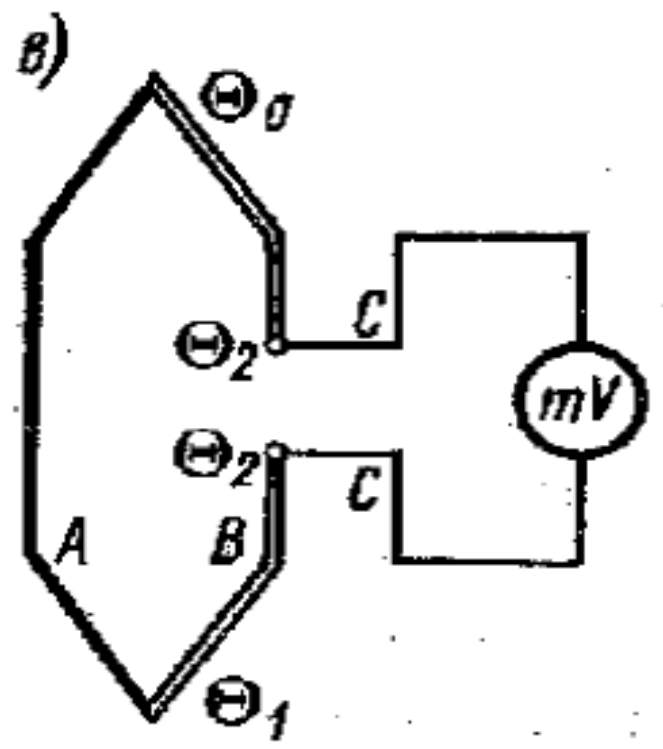
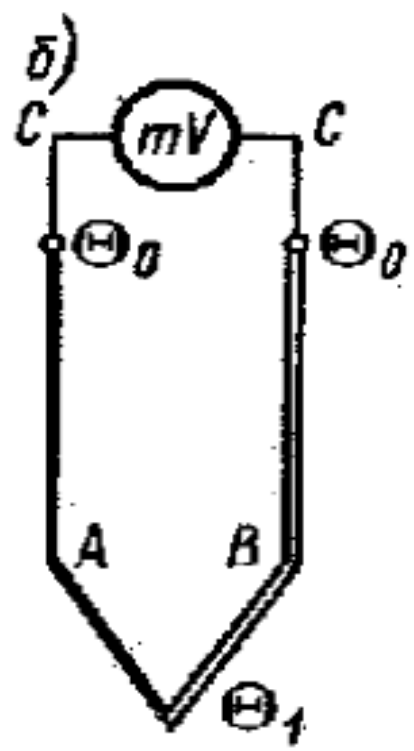
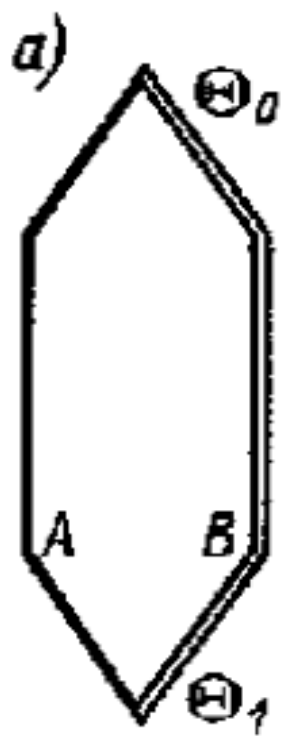
Точность измерений зависит от глубины погружения Ж. т. в измеряемую среду. Погружать Ж. т. следует до отсчитываемого деления шкалы или до спец. нанесённой на шкале черты

Термоэлектрические преобразовательные элементы.

Термопары

- Принцип действия основан на использовании термоэлектрического эффекта: возникновение термо-ЭДС в цепи, состоящей из двух разнородных проводников или полупроводников, называемых термоэлектродами, если температура соответствующих частей T_1 и T_2 разные.
- Открытие 1823 г. (Зеебек). Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) A и B , соединив их между собой концами причем температуру одного места соединения сделать отличной от температуры другого, то в цепи потечет ток под действием ЭДС, называемой термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников. Эта контактная разность потенциалов обусловлена различием уровней Ферми у двух разнородных металлов. Чем выше температура, тем большее число электронов находятся на более высоком энергетическом уровне, чем уровень Ферми. Из-за этого контактная разница потенциалов становится зависящей от температуры.

Уровень Ферми — энергетический уровень, который при абсолютном нуле температур разделяет полностью заполненные квантовые состояния от полностью незанятых состояний



Напряжение термопары

Часто используемый сплавы

хромель — 90 % Ni, 10 % Cr,
константан — 54 % Cu, 45 % Ni, 1 % Mn,
алюмель — 95 % Ni, 3 % Mn, 2 % Al, 1 % Si.

ТермоЭДС является мерой разности температур между двумя контактами. Более точно выходное напряжение термопары можно записать в виде степенного ряда от разности температур $T - T_0$, где T_0 — некоторая заданная температура калибровки, то есть

$$V = a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2 + \dots + a_n(T - T_0)^n .$$

По мере увеличения n это выражение будет описывать поведение данной термопары все более точно. Каждая термопара (каждая комбинация двух металлов) характеризуется собственным рядом *температурно-независимых* коэффициентов a_i ($i = 1, \dots, n$). Для большинства материалов требуется примерно восемь коэффициентов a_i ($n = 8$), чтобы получить погрешность $\pm 1\%$. Коэффициент a_1 носит название *коэффициента Зеебека*. На рис. 3.16с показано, как зависел бы этот коэффициент от температуры, если бы характеристика термопары описывалась только одним-единственным коэффициентом a_1 .

Если мы имеем дело с большим диапазоном температур, то для достижения необходимой точности следует использовать больше одного коэффициента. Это сделать легко, когда доступен компьютер. Мы можем ввести в компьютер кусочно-линейную аппроксимацию используемой термопары.

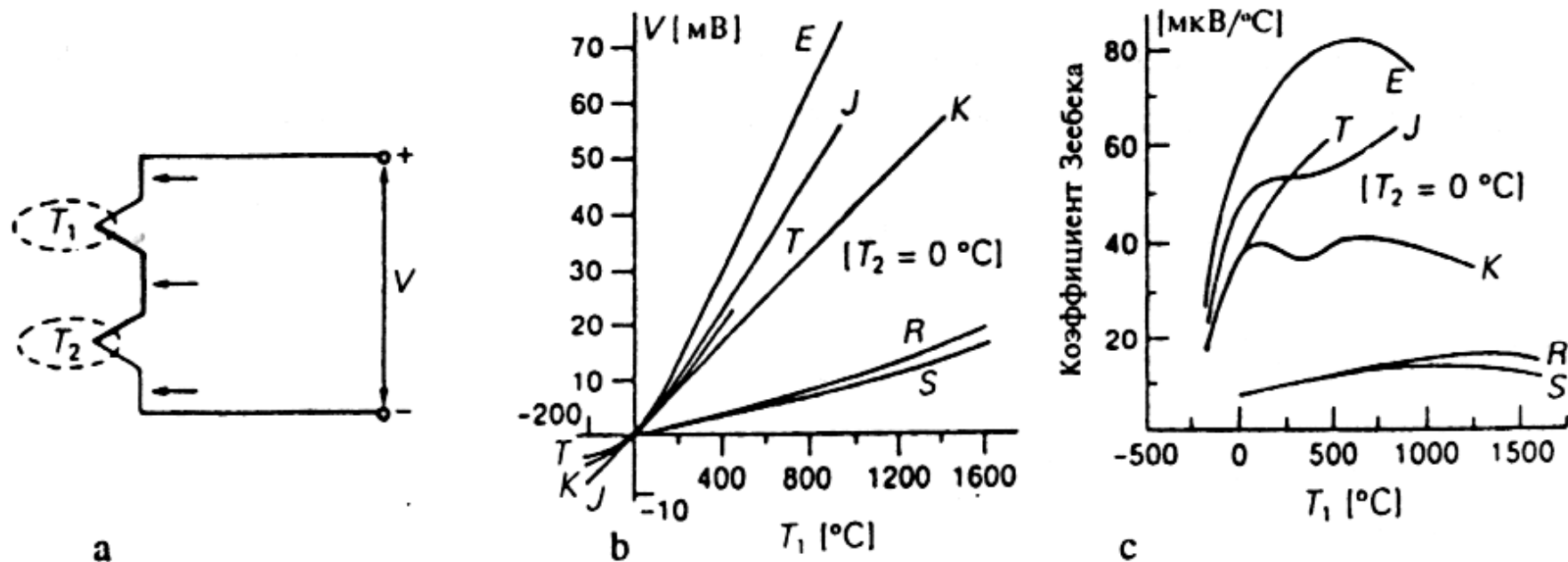


Рис. 3.16. (а) Термопара, образованная двумя контактами разнородных металлов, находящимися при различных температурах T_1 и T_2 ; (б) характеристики некоторых обычно применяемых термопар (буквами указаны различные комбинации металлов): E — хромель-константан; J — железо-константан; K — хромель-алюмель; T — медь-константан; R — (87% Pt, 13% Rh) — платина; S — (90% Pt, 10% Rh) — платина; (с) значение коэффициента Зеебека для этих термопар как функция температуры T_1 при заданной опорной температуре $T_2 = 0^{\circ}\text{C}$

При малом диапазоне температур около $T_2 = 0^{\circ}\text{C}$ можно воспользоваться следующими значениями коэффициента Зеебека a_1 для различных типов термопар:

тип E : 61 мкВ/К, тип K : 40 мкВ/К,
тип J : 52 мкВ/К, тип R : 6 мкВ/К,
тип T : 41 мкВ/К, тип S : 6 мкВ/К.

Термоэлектричество

- Явление термоэлектричества принадлежит к числу обратимых явлений, обратный эффект был открыт в 1834 г. Жаном Пельтье и назван его именем. Если через цепь, состоящую из двух различных проводников или полупроводников, пропустить электрический ток, то теплота выделяется в одном спае и поглощается в другом. Теплота Пельтье связана с силой тока линейной зависимостью в отличие от теплоты Джоуля, и нагревание или охлаждение спаев зависит от направления тока через спай. В термопаре этот эффект является нежелательным, т.к. вносит погрешность.

— *Эффект Томсона.* Если через однородный металлический проводник течет ток в направлении, совпадающем с отрицательным температурным градиентом, то будет выделяться термоэлектрическая теплота. Если направление тока изменить на обратное, то тепло будет поглощаться проводником. Этот обратимый эффект также следует из того факта, что процесс электропроводности в металле сопровождается передачей тепла и, наоборот, теплопроводность сопровождается электропроводностью. Этот эффект также вносит ошибки.

Термоэлектричество

— *Джоулево тепло.* В двух последних явлениях мы предполагали, что нет выделения тепла из-за рассеяния электрической энергии в электрическом сопротивлении металлов. Если полное сопротивление равно R , то в виде тепла рассеивается I^2R джоулей в секунду. Поэтому термопара сама себя нагревает. Таким образом, очевиден вывод, состоящий в том, что через термопару не следует пропускать ток, если мы заинтересованы в точном измерении температуры; схема измерения должна иметь высокий входной импеданс.

Дополнительный источник ошибок возникает из-за влажности. Влага может образовывать с каждым из металлов гальванический элемент, причем вырабатываемое им напряжение во много раз больше, чем напряжение термопары. Поэтому термопару часто помещают в водонепроницаемый корпус.

Термоэлектричество

Summary

1. Явление Томпсона - электроны диффундируют от горячего конца к холодному, следовательно на концах возникает разность потенциалов.
 2. Явление Зебека - в месте контакта разнородных проводников - контактная разность потенциалов, обусловленная различной концентрацией носителей зарядов.
- Прибор для измерения термо- ЭДС может быть включен как между свободными концами, так и в разрыв одного из термоэлектродов.
 - Материалы:
 - Платина + платинородий $\Delta T = 0 \div 1200^\circ\text{C}$
 - Медь + медноникель
 - железо + медноникель
 - хромель + медноникель $\Delta T = -200 \div +400^\circ\text{C}$

Терморезисторы

- Принцип действия основан на зависимости сопротивления от температуры
- Например, в диапазоне 0–630⁰С сопр. хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$R_t = R_0 \left(1 + At + Bt^2 \right)$$

где R_t и R_0 – сопротивление при температуре t и 0⁰С;

- A и B – Табличные коэффициенты ($B < 0$).
- Прецизионные ТСП довольно хрупкие, боятся ударов, вибрации, так как это может привести к механическим напряжениям в чувствительном элементе, замыканию его витков или разрушению оболочки.

Терморезисторы металлические

- Миниатюрные вжигаемые пленки 1-2 мм в керамическое основание, ширина 0,1-0,2 мм; длина 5-10 мм.
- Сопротивление растёт при увеличении температуры.
- Платина $\Delta T = -260 \div +1100$ °C
- Медь $\Delta T = -200 \div -50$ °C
- Вольфрам, никель $\Delta T = 180 \div +1200$ °C

Терморезисторы полупроводниковые

- Характеристики: меньшие габариты, большой температурный коэффициент сопротивления.
- Сопротивление падает при увеличении температуры.
- Высокая динамическая реакция (несколько микросек) .
- Недостаток: нелинейность $R(t)$, значительный разброс параметров.
- $\Delta t = -80 \div +150$ °C.
- Ge: до +200 °C
- Si: до +500 °C

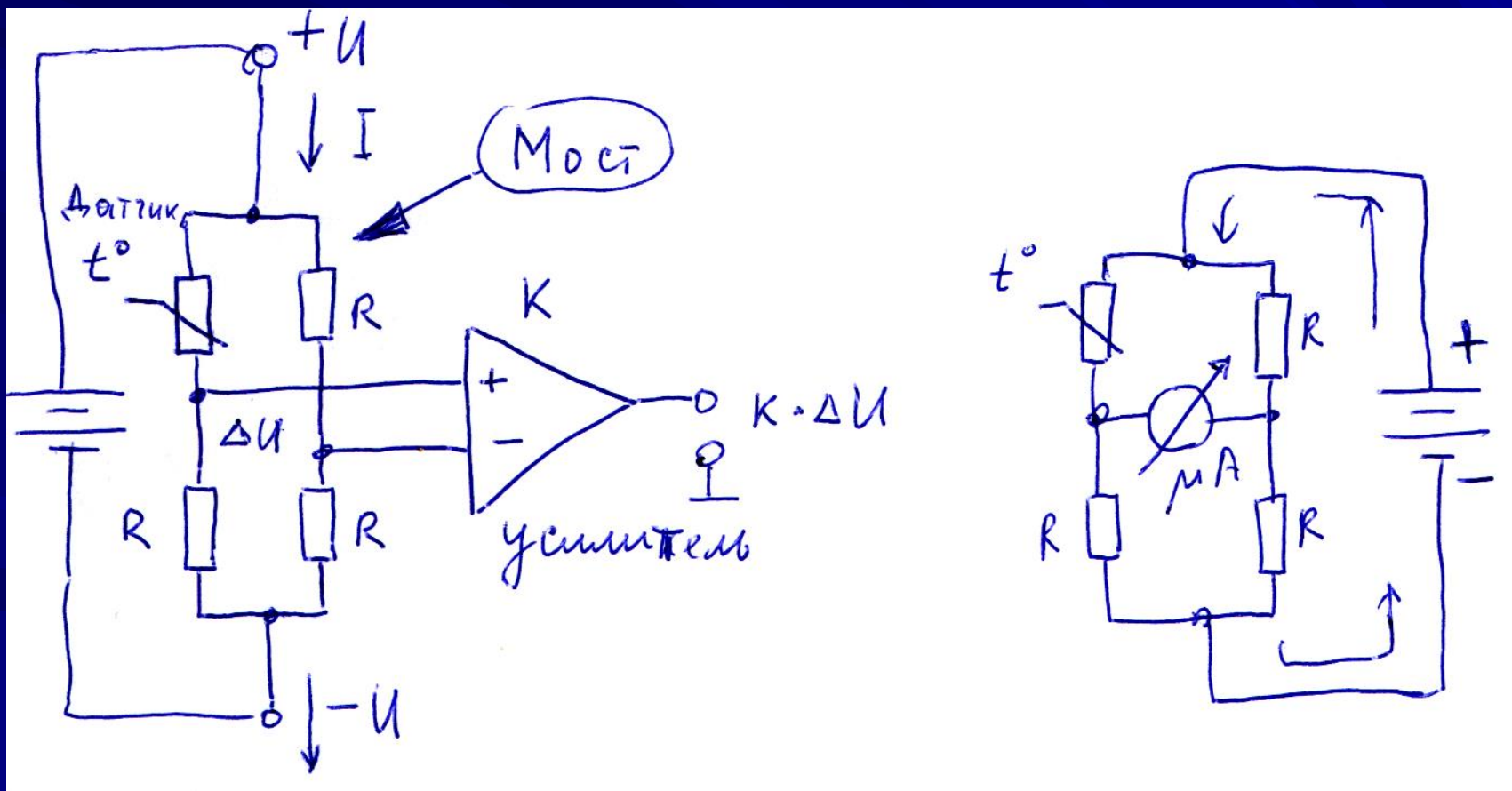
- Измерительные цепи строят на основе уравновешенных мостов или используют преобразование изменения сопротивления в изменение напряжения (в цифровых схемах).

Электротермометр

- Основой прибора является терморезистор
- Термометры сопротивления относятся к одним из наиболее точных преобразователей температуры. Так, например, платиновые терморезисторы позволяют измерять температуру с погрешностью порядка $0,001^{\circ}\text{C}$.

Схема термометра

- В диагональ моста включен микроамперметр, проградуированный в градусах Цельсия (операционный усилитель с выходом на схему индикации).



Типы датчиков термометра

- Каждый датчик термометра состоит из терморезистора , оправы, соединительных проводов и разъема .
- Терморезистор - шарик диаметром $0.6\div 0.8$ мм из полупроводникового материала, покрытый стеклянной оболочкой.
- Типы датчиков:
 - 1) подмышечный датчик
 - 2) кожный датчик
 - 3) ректальный датчик
 - 4) стержневой датчик - для кратковременного замера температуры в различных точках кожного покрова совместно с внутримышечной иглой для измерения температуры внутри тканей тела.
 - 5) желудочный датчик
 - 6) сердечный датчик - для измерения температуры в венах, артериях и полости сердца

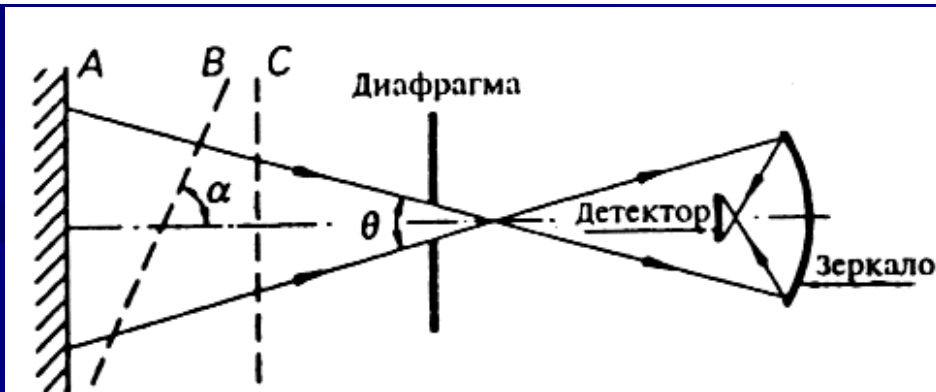
Термометры излучения

Термометр излучения поглощает часть инфракрасного излучения, испускаемого объектом измерения. Термометр для высоких температур обычно называют *пирометром* (от греч. *pur* — огонь). Обычно излучение фокусируется непосредственно на тепловом детекторе с помощью вогнутого зеркала (как показано на рис. 3.18а). Если температура объекта измерения более низкая, чем у детектора, то детектор будет источником тепловой энергии, отдаваемой объекту, сам при этом охлаждаясь. Поскольку линзы, хорошо пропускающие тепловое излучение (теплопрозрачные инфракрасные линзы), очень дороги, избегают их применения, особенно при низких температурах. В частности, длинноволновое инфракрасное излучение, очень сильно поглощается большинством материалов. Например, кусок стекла толщиной 2 мм поглотит 50 % инфракрасного излучения с длиной волны 2 мкм. Двухмиллиметровый слой плавикового шпата (CaF_2) поглощает 50 % излучения с длиной волны 7 мкм, а в двухмиллиметровом кристаллическом йодистом цезии поглощается 50 % излучения с длиной волны 70 мкм. Такие материалы трудно обрабатывать, часто они неводостойки и т. д.

Оптическая схема термометра ИК-излучения, согласующая тепловой детектор с объектом измерения

Как показано на рис. расстояние от объекта измерения до пирометра не имеет значения, поскольку в каждом положении объекта A и C он отдает одно и то же тепловое излучение пирометру, если его поверхность полностью охватывается углом раскрыва θ . Мощность излучения точечного источника обратно пропорциональна квадрату расстояния, а площадь обзора увеличивается пропорционально квадрату расстояния, так что в случае, когда угол обзора пирометра полностью покрывает (изотермический) объект, суммарный результат измерения будет одним и тем же.

Если объект излучает равномерно во всех направлениях (так называемый излучатель Ламберта), то энергия излучения, которую получает детектор, не будет изменяться даже в том случае, когда поверхность такого измеряемого объекта находится под углом α (при условии, что $\alpha \neq 0^\circ$ или 180°) к оси пирометра.



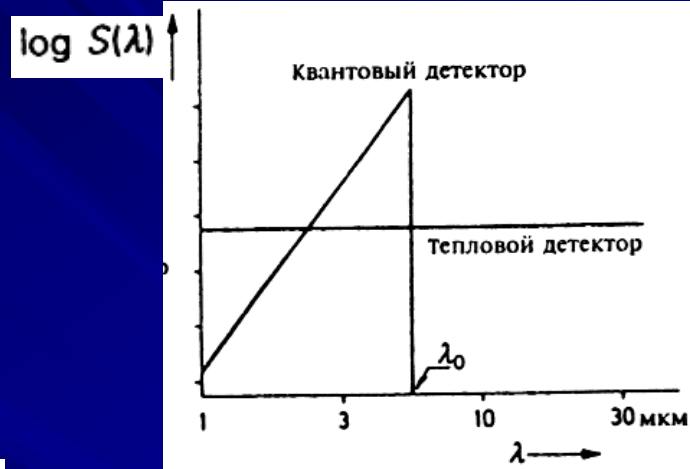
Типы детекторов пирометра

В пирометрах используются два типа детекторов: тепловые и квантовые. *Тепловой детектор* или *поглощающий детектор* преобразует падающее излучение в повышение температуры. Затем это повышение температуры можно измерить одним из способов, описанных выше, например с помощью терморезистора или используя термобатарею, то есть несколько соединённых последовательно термопар. Достоинством тепловых детекторов является постоянство чувствительности в широком диапазоне длин волн (рис. 3.18b). Однако у этих детекторов медленный отклик из-за относительно большой тепловой массы. Типичное значение времени готовности инструмента будет лежать между 1 и 10 секундами.

В пирометрах других типов применяются *квантовые детекторы*, принцип действия которых основан на возбужденных инфракрасным излучением электронах материала. Они появляются только тогда, когда энергия кванта излучения E равна определенному пороговому значению E_0 или больше него. Это пороговое значение соответствует переходу электронов на более высокий энергетический уровень. Энергией, равной пороговому значению

$$E_0 = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

или превосходящей его, может обладать квант инфракрасного излучения с частотой выше некоторой минимальной частоты f_0 или с длиной волны ниже некоторой максимальной величины λ_0 . На рис. 3.18b приведена *абсолютная* спектральная чувствительность квантового детектора такого типа. В качестве квантовых детекторов ближнего инфракрасного излучения используются фотодиоды, а для дальнего инфракрасного излучения применяются фоторезисторы. Квантовые детекторы имеют малое время отклика, но измеряют излучение только в ограниченном диапазоне длин волн.

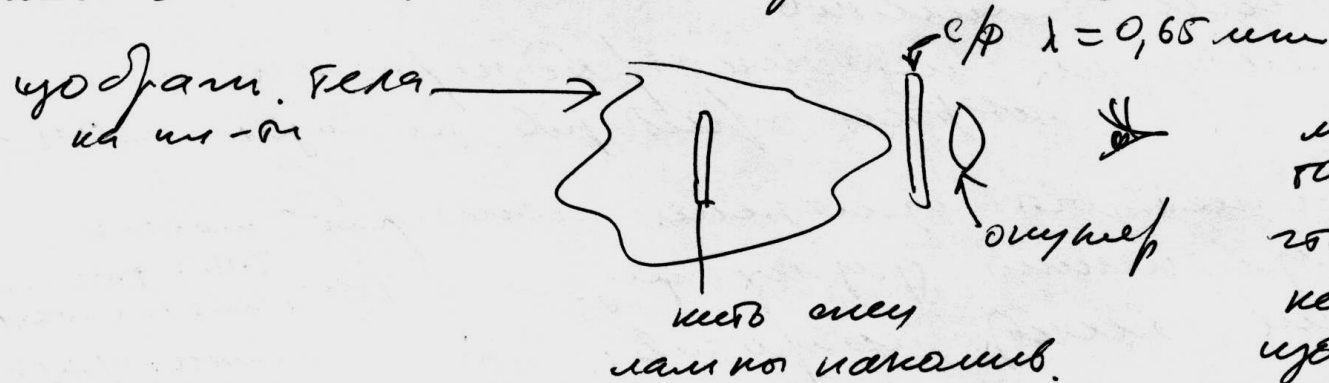


Упрощённая зависимость спектральной чувствительности $S(\lambda)$ квантового и теплового детекторов.

Пирометр - темп нагретых тел измеряется по
интенсивности их теплового излучения в оптич. диапазоне

П. - яркостные, цветные и радиационные

Каждый имеет точность - яркостное



меньше ток накала,
тогда яркость
меньше и
устройство
сравнительно

шкала прибора, решетчатая. ток накала предпринимать в °C
и °K

яркостная темп T_0 тела.

левый канал темп радиационная:

$$T = T_0 C_2 / (C_2 + \lambda_3 T_0 \ln d_{x,T})$$

$C_2 = 0,01488 \text{ м.к}$, $d_{x,T}$ - коэф. поглощ.

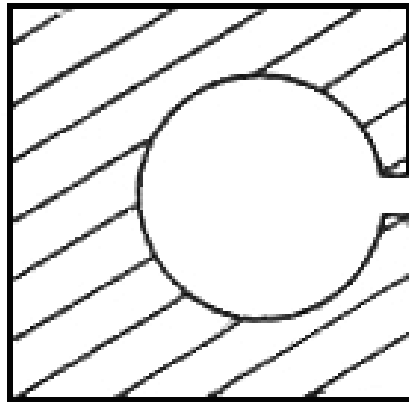
x_2 - оптич. путь в мм.

Радиационно-оптическая термометрия Закон Кирхгофа

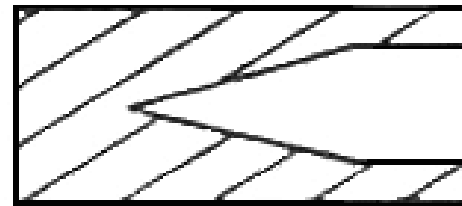
К. з. и. явл. одним из осн. законов *теплого излучения* и не распространяется на др. виды излучения. Он установлен нем. физиком Г. Р. Кирхгофом (G. R. Kirchhoff) в 1859 на основании *второго начала термодинамики* и затем подтверждён экспериментально. Согласно К. з. и., тело, к-рое при данной температуре лучше поглощает излучение, должно интенсивнее излучать.

КІРХГОФА ЗАКОН ИЗЛУЧЕНИЯ,
закон, утверждающий, что отношение
испускают. способности $\varepsilon(\lambda, T)$ тел
к их поглощают. способности $\alpha(\lambda, T)$
не зависит от природы излучающего
тела, равно излучают. способности аб-
солютно чёрного тела $\varepsilon_0(\lambda, T)$ и за-
висит от длины волны излучения λ
и абс. темп-ры T : $\frac{\varepsilon(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = \varepsilon_0(\lambda, T)$.

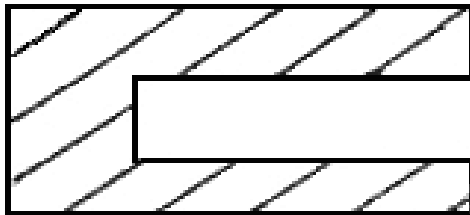
Абсолютно чёрное тело



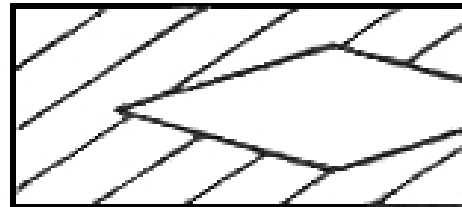
(A) Сферическое



(B) Коническое



(C) Цилиндрическое



(D) Инверсное
коническое

Законы излучения абсолютно черного тела

■ Стефана-Больцмана

w - мощность излучения с единицы поверхности

T – абсолютная температура, кельвины.

$c = 5,66697 \cdot 10^{-6} \text{ ватт/м}^2 \text{ К}^{-4}$

постоянная.

$$w = c \cdot T^4$$

■ Вина

λ - положение максимума в спектре излучения

$$\lambda \cdot T = \text{const}$$

Энергия излучения, испускаемая объектом измерения при данной температуре поверхности, обычно меньше, чем энергия, излучаемая абсолютно черным телом при той же температуре; коэффициент излучения объекта измерения меньше единицы. (Абсолютно черное тело имеет коэффициент излучения, равный единице, а у идеального отражателя коэффициент излучения равен нулю.) Коэффициент излучения поверхности равен ее коэффициенту поглощения. И тот и другой могут зависеть от длины волны излучения. У некоторых объектов, хорошо отражающих видимый свет, может быть большим коэффициент излучения в инфракрасной области, и наоборот.

Коэффициент излучения ε различных материалов в инфракрасном диапазоне имеет следующие значения: $\varepsilon = 0,03—0,05$ для полированных металлических поверхностей, $\varepsilon = 0,9$ для лаковых и эмалевых пленок, $\varepsilon \approx 0,92$ для коллоидного графита и $\varepsilon \approx 0,96$ для воды и льда. Часто для обеспечения большой величины ε объект покрывают тонким слоем коллоидного графита. Иногда в объекте просверливают отверстия. Если отношение диаметра отверстия к его глубине менее $1/6$, то оно ведёт себя как виртуальный абсолютно черный излучатель.

Если коэффициент излучения ε не равен единице, то выполненное с помощью пирометра измерение будет содержать ошибку. Плотность энергии излучения P удовлетворяет закону Стефана—Больцмана $P = \varepsilon c T^4$, где c — константа ($c = 5,7 \times 10^{-8}$ Вт·м² К⁻⁴), а T — абсолютная температура. Поэтому коэффициент ошибки при измерении температуры, связанной с тем, что ε меньше единицы, равен $\varepsilon^{1/4}$.

Радиационно – оптическая термометрия

осуществляется в дальнем ИК- диапазоне 5 - 15 мкм путём регистрации мощности (потока) теплового излучения.

Пример

Температура поверхности Солнца 6000°K. Максимум чувствительности глаза по длинам волн (цвету) излучения совпадает с максимумом в спектре излучения Солнца $\lambda=0,55$ мкм. Из закона Вина легко вычисляется длина волны излучения любого тела (предмета или человека) :

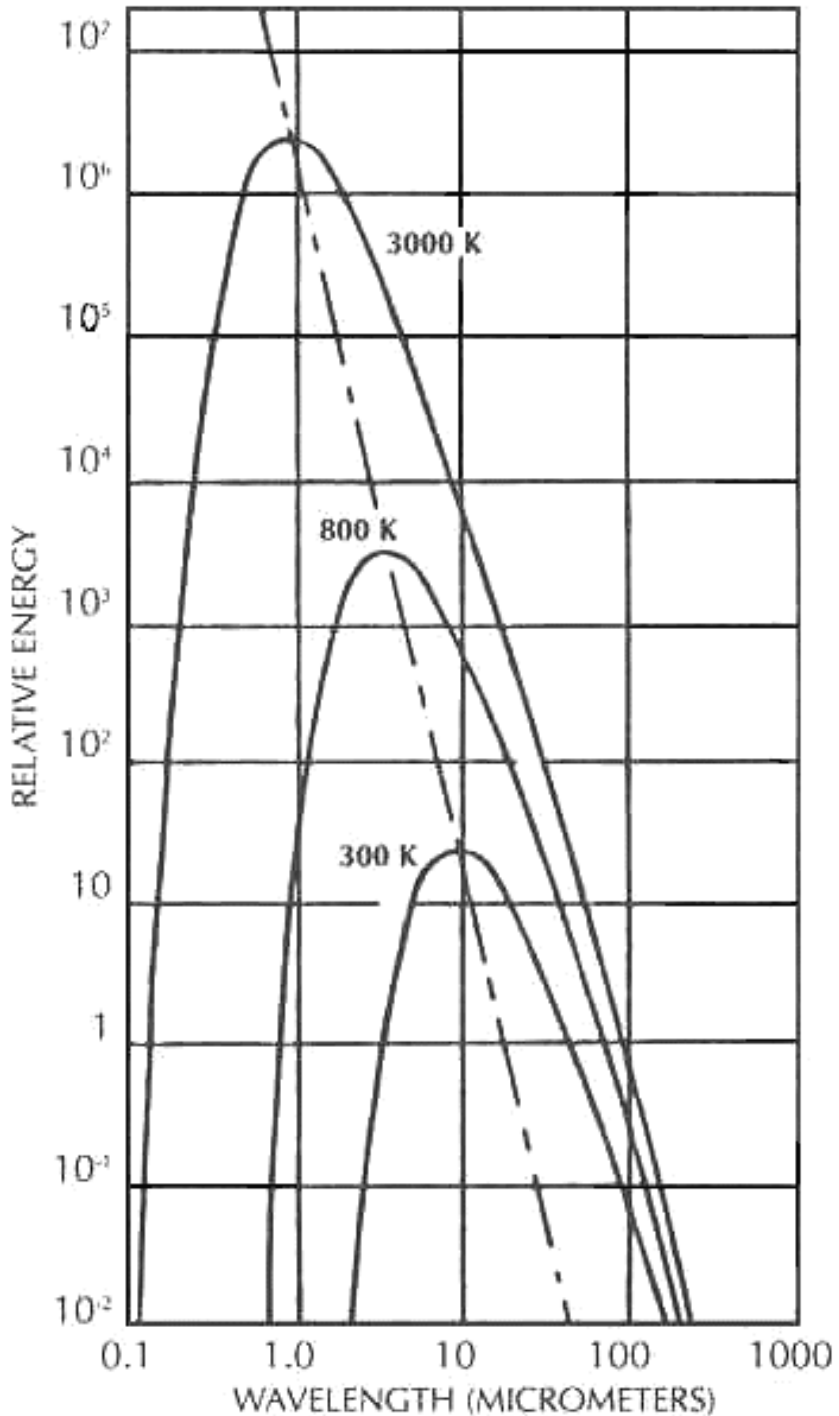
$$0,55 \text{ мкм} \cdot 6000 \text{ }^\circ\text{K} = \text{const} = x \text{ мкм} \cdot 300 \text{ }^\circ\text{K}$$



$$X = 20 \cdot 0,55 \sim 11 \text{ мкм.}$$

Поток зависит от четвёртой степени температуры и даже небольшой перепад в температуре приводит к заметному перепаду в мощности, что и позволяет визуализировать (и различать) предметы и поверхности и строить тепловые топограммы.

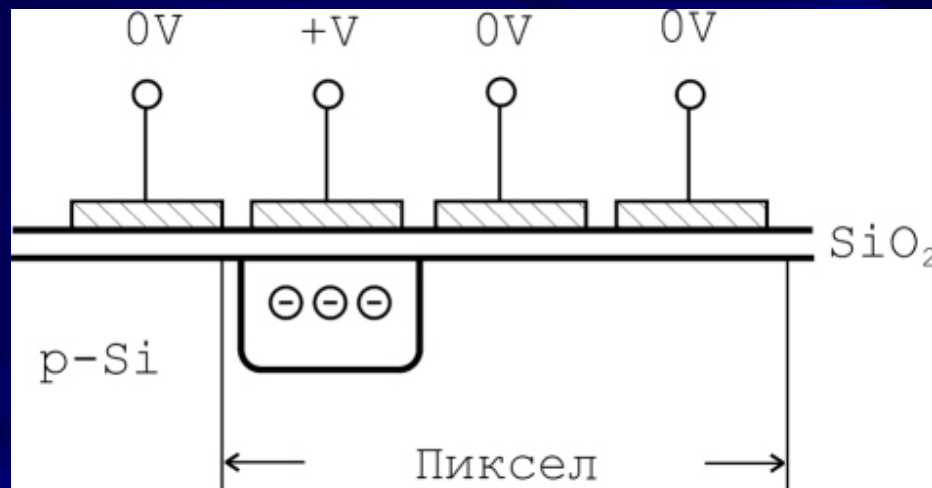
Интенсивность излучения как функция длины волны и температуры (Закон Планка)



Мощность w – интеграл под кривыми. Пунктирная линия проходит через пики спектральных кривых.

Физические принципы работы ПЗС-матрицы

- Приборы с зарядовой связью (ПЗС) относятся к классу твердотельных полупроводниковых приемников
- Упрощенно прибор с зарядовой связью можно рассматривать как матрицу близко расположенных МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) -конденсаторов.
- Электрический сигнал в них представлен не током или напряжением, а зарядом. При соответствующей последовательности тактовых импульсов напряжения на электродах МДП-конденсаторов зарядовые пакеты можно переносить между соседними элементами прибора. Поэтому такие приборы и названы приборами с переносом заряда или с зарядовой связью.

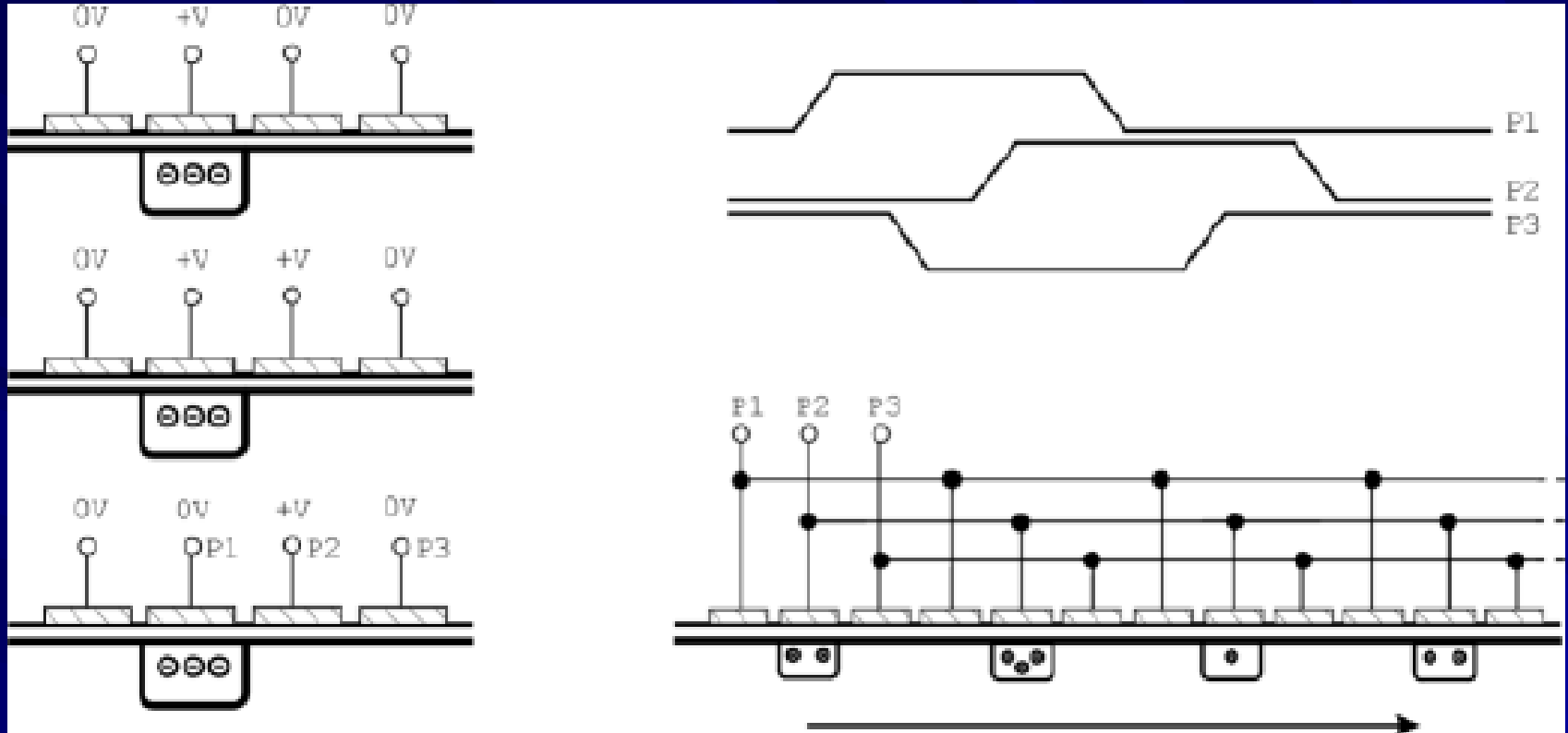


Структура одного элемента, линейного трехфазного ПЗС в режиме накопления. Структура состоит из слоя полупроводника (кремния) р-типа (обеднённый электронами – дырочная проводимость) (подложка), изолирующего слоя (двуокиси кремния) и набора пластин-электродов. Один из электродов смещен более положительно, чем остальные два, и именно под ним в потенциальной яме происходит накопление заряда в процессе облучения.

Полупроводник р-типа, получают добавлением (легирование) к кристаллу кремния акцепторных примесей, например, атомов бора. Акцепторная примесь создает в кристалле полупроводника свободные положительно заряженные носители — дырки. Дырки в полупроводнике р-типа являются основными носителями заряда: свободных электронов там очень мало. Если теперь подать небольшой положительный потенциал на один из электродов ячейки трехфазного ПЗС, а два других электрода оставить под нулевым потенциалом относительно подложки, то под положительно смещенным электродом образуется область обедненная основными носителями — дырками. Они будут оттеснены вглубь кристалла. На языке энергетических диаграмм это означает, что под электродом формируется потенциальная яма с *n*-типом проводимости.

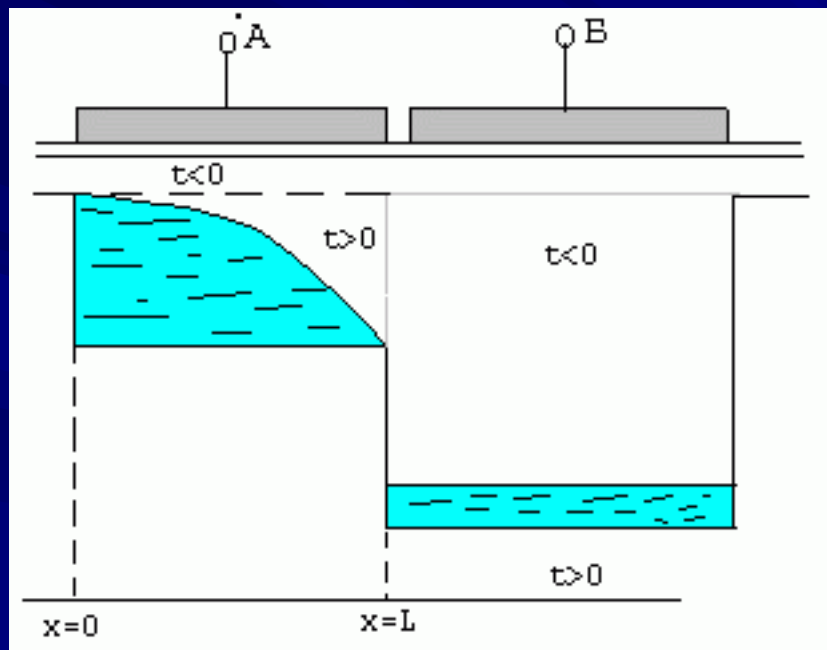
- В основе работы ПЗС лежит явление внутреннего фотоэффекта. Когда, в кремнии поглощается фотон, то генерируется пара носителей заряда — электрон и дырка. Электростатическое поле в области элемента (пиксела) “растаскивает” эту пару, вытесняя дырку в глубь кремния. Неосновные носители заряда, электроны, будут накапливаться в потенциальной яме под электродом, к которому подведен положительный потенциал. Здесь они могут храниться достаточно длительное время, поскольку дырок в обедненной области нет и электроны не рекомбинируют. Носители, сгенерированные за пределами обедненной области, медленно движутся — диффундируют и, обычно, рекомбинируют с решеткой прежде, чем попадут под действие градиента поля обедненной области. Носители, сгенерированные вблизи обедненной области, могут диффундировать в стороны и могут попасть под соседний электрод. (В красном и инфракрасном диапазонах длин волн ПЗС имеют разрешение хуже, чем в видимом диапазоне, так как красные фотоны проникают глубже в кристалл кремния и зарядовый пакет размывается.)

Перенос заряда



■ Заряд, накопленный под одним электродом (пикселем), в любой момент может быть перенесен под соседний электрод, если его потенциал будет увеличен, в то время как потенциал первого электрода, будет уменьшен. Перенос в трехфазном ПЗС можно выполнить в одном из двух направлений (влево или вправо, по рисункам). Все зарядовые пакеты линейки пикселей будут переноситься в ту же сторону одновременно. Двумерный массив (матрицу) пикселей получают с помощью стоп-каналов, разделяющих электродную структуру ПЗС на столбцы. Стоп каналы — это узкие области, формируемые специальными технологическими приемами в приповерхностной области, которые препятствуют растеканию заряда под соседние столбцы.

Модель переноса заряда между двумя элементами ПЗС



Если на электрод Б подать большее положительное напряжение, чем на электрод А, то заряд из потенциальной ямы под А перетекает в потенциальную яму под электродом Б.

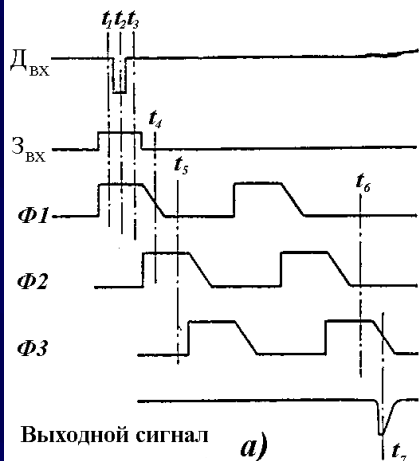
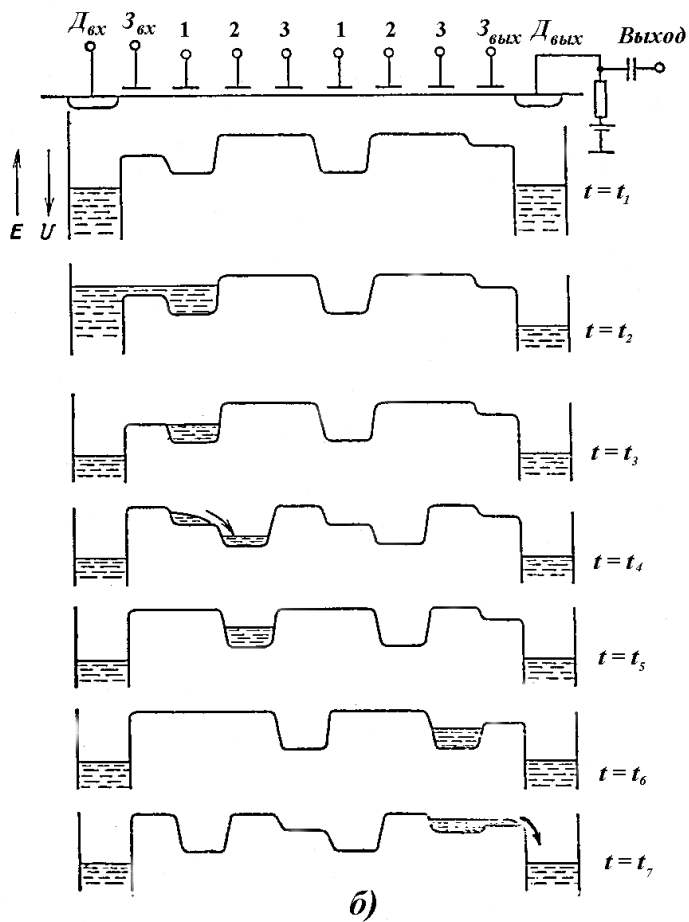


Рис.5. Принцип работы ПЗС, показанного на рис.4.

а — временная диаграмма управляющих импульсов и выходного сигнала;
 б — распределение потенциала и заряда в ПЗС. Выходной затвор и выходной диод находятся под постоянным смещением.



Модель переноса заряда вдоль линейки элементов ПЗС

Классификация тепловизоров по типу фотоприёмников

Выделяются матричные и сканирующие тепловизоры. Чаще используются матричные тепловизоры.

В матричных тепловизорах в качестве одного элемента (пиксела) применяются следующие фотоприёмники

1. ПЗС – матрицы. На основе узкозонных полупроводников $Cd_xHg_{1-x}Te$ и $InAs$
2. Фотодиоды . На основе узкозонных полупроводников
3. Фотосопротивление. На основе узкозонных полупроводников
4. Болометры (термосопротивление), включенные по мостовой схеме.
5. Пироприёмники. $LiNbO_3$ (ниобат лития)

Большинство из них требуют специального охлаждения до температур порядка 77 °К. (За исключением пироприёмников.)

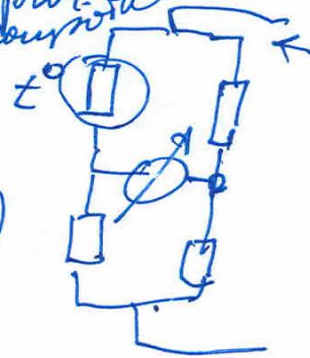
Типы тепловизоров: 1) Болонетров-зависимые термосистемы

2) ПЗС $CdHgTe$ (ИФП) приборы с $\lambda_{\text{зв.связью}}$ (как фотокамера)

3) Пиро приемники



ниобат лития.



Все приборы не требуют охлаждения
работают на Δt (град t°)

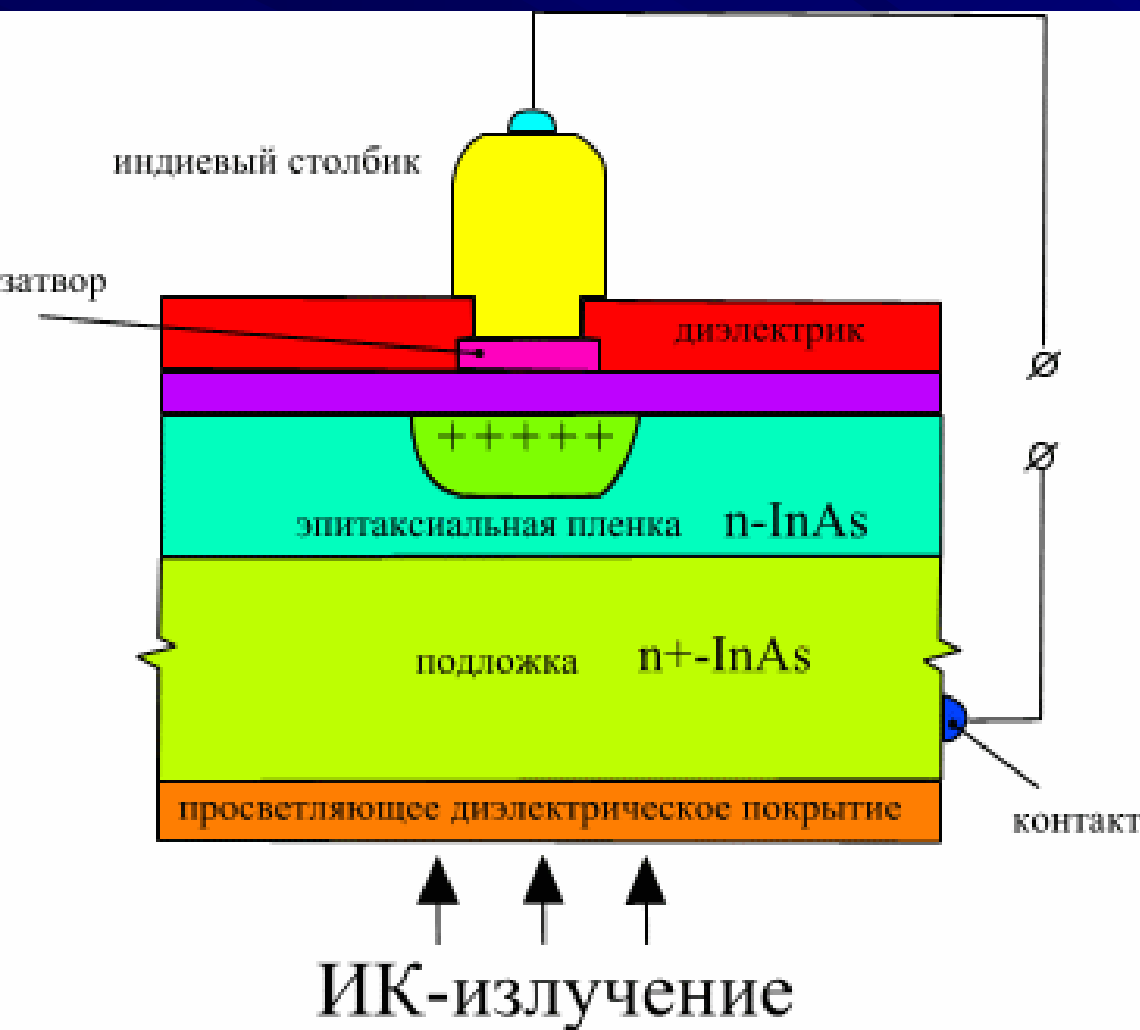
4) фотосопротивления.

(Требуют охлаждения) Ж. Азот, Пеньдье.



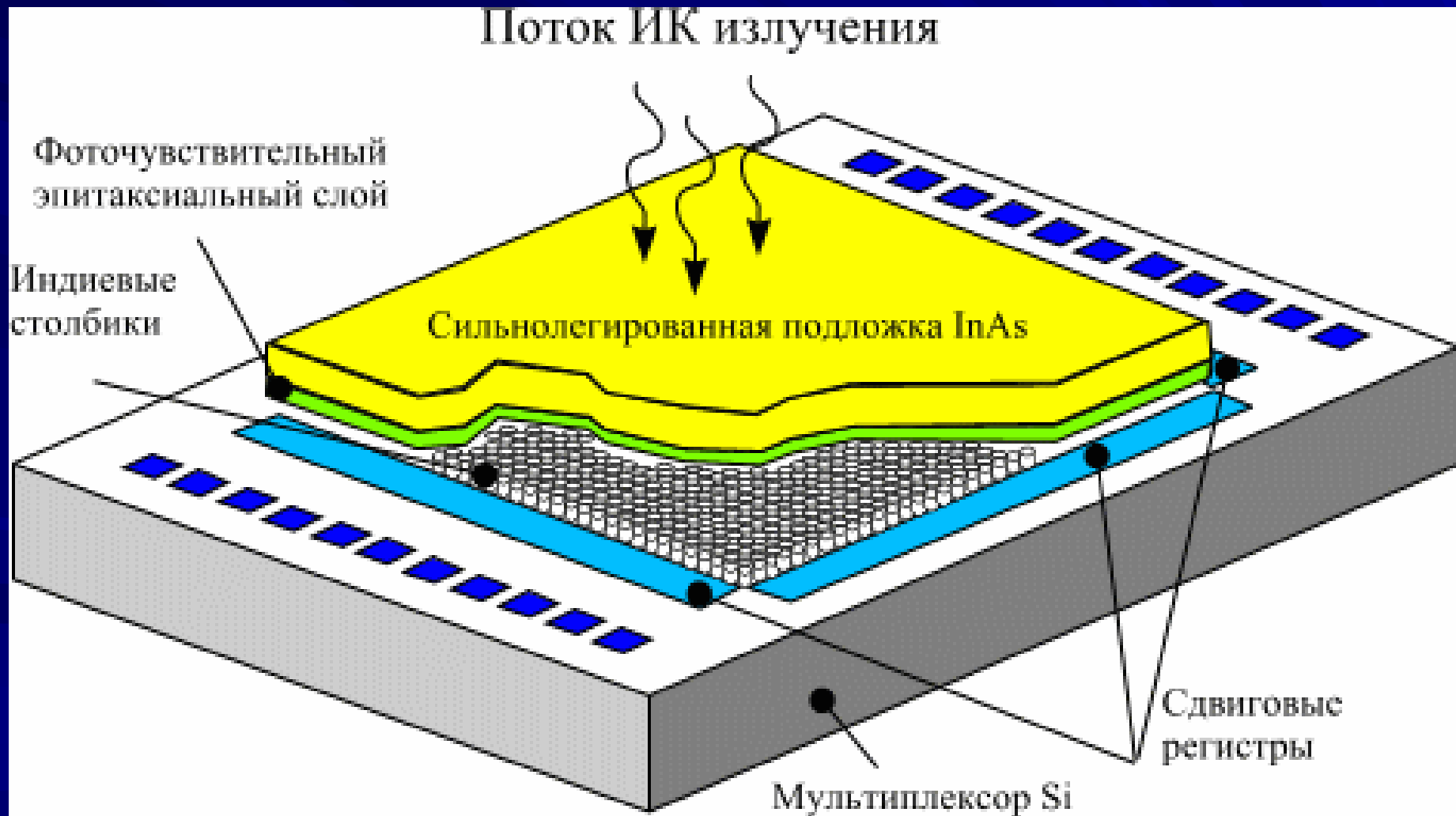
Везде применят hotel матрицы

Устройство тепловизора

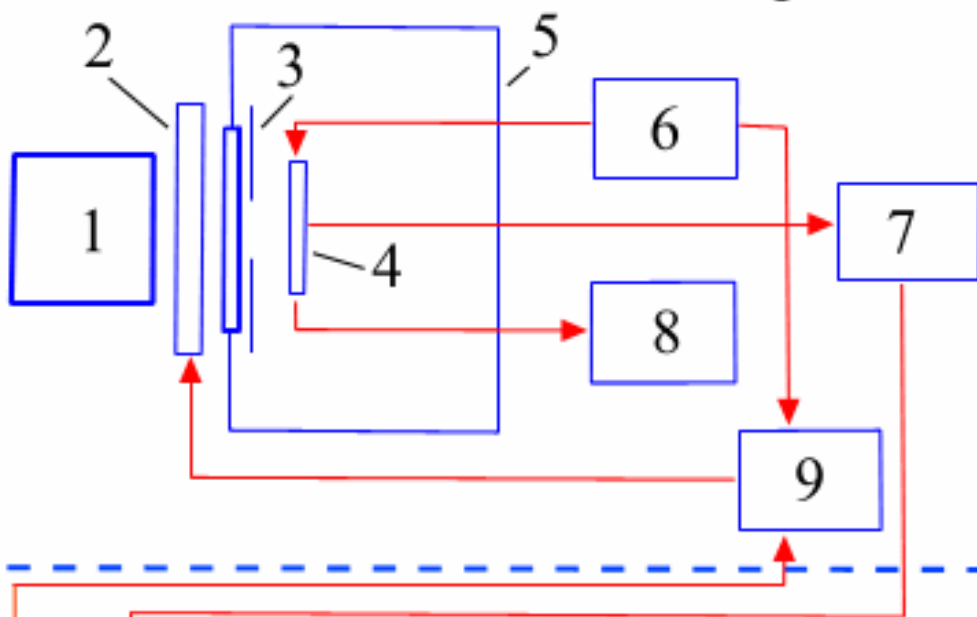


Строение
фотонного
приёмника.

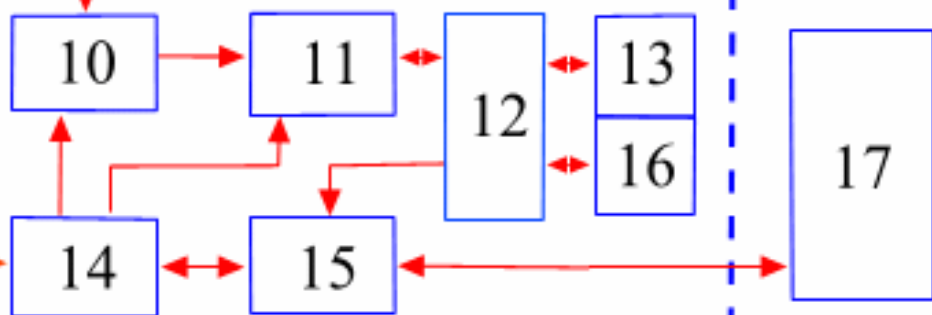
Фоточувствительная матрица регистрирует собственное излучения кожных покровов.



Тепловизионная камера



Контроллер



Блок-схема

тепловизионной камеры.

1 - объектив, 2 - устройство калибровки, 3 - холодная диафрагма, 4 - матричное ФПУ, 5 - вакуумный криостат с просветленным окном, 6 - генератор управляющих импульсных и постоянных напряжений, 7 - усилитель с дифференциальным выходом, 8 - измеритель температуры ФПУ и автомат включения напряжения смещения подложки InAs, 9, 14 - блоки управления и синхронизации, 10 - АЦП, 11 - сумматор, 12 - диспетчер памяти, 13, 16 - банки памяти, 15 - блок связи с персональным компьютером, 17 - персональный компьютер

Тепловизионная камера

- Состав тепловизионной камеры :
- германиевый объектив (диаметр 26 мм, фокусное расстояние 20,5 мм;
- детектирующая гибридная микросхема DIMS InAs 128x128;
- узел калибровки;
- заливной азотный криостат "K02";
- электронная плата управления и обработки сигналов с питанием от компьютера;
- штатив стандартный типа "ТН 650".

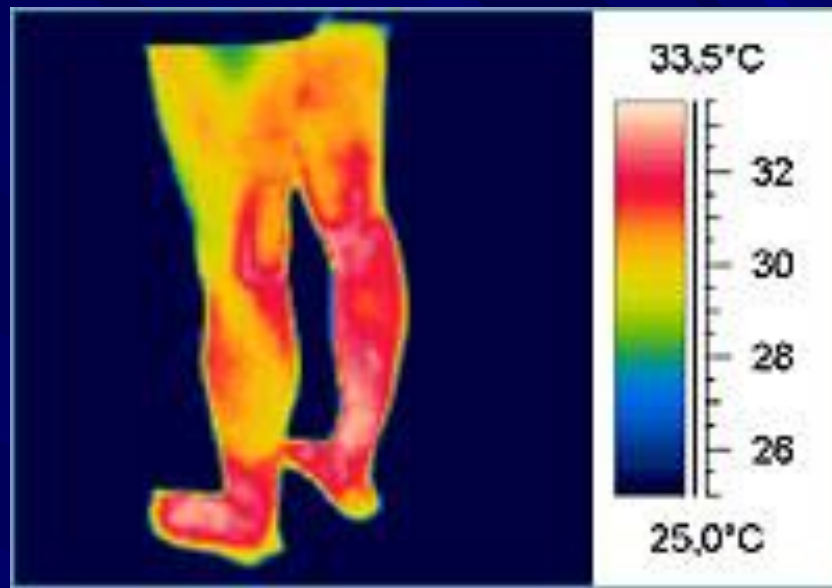
Общий вид тепловизионной камеры в сборе



1 - отсек криостата с охлаждаемой фокальной матрицей, 2 - отсек объектива и узла калибровки, 3 - отсек электроники, 4 - горловина для заливки жидкого азота, 5 - штатив, 6 - расположение разъема под стандартный высокоскоростной кабель USB 2.0 A/B Cable (DUB-C5AB)

Тепловизор "Свит"

■ обладает рекордной по сравнению с классическими медицинскими тепловизорами температурной чувствительностью: СКО (среднеквадратичное отклонение) шума в режиме реального функционирования прибора на большинстве элементов матрицы соответствует температуре около $0,025^{\circ}\text{C}$. Высокое температурное разрешение особенно важно при использовании прибора в медицине, поскольку позволяет регистрировать важные с диагностической точки зрения слабо контрастные участки термограмм. Тепловизор с температурным разрешением в $0,1^{\circ}\text{C}$ приводит к размытию слабоконтрастных очагов на термограммах, и элементы тонкой структуры (сосудистый рисунок, мелкоочаговая гипер- и гипотермия) становятся невидимыми, превращаясь в крупные пятна. При этом повышенное пространственное разрешение таких тепловизионных камер (256×256 элементов в кадре) является просто излишним.



При помощи термографии **выявляются:**

Воспалительные, дистрофические и неопластические (опухолевые) процессы в тканях и внутренних органах. (Состояние внутренних органов проявляется в свечении зон Захарьина – Геда.)

Функциональное состояние микроциркуляции крови, исследуются сосудистые реакции.

Патологии кровообращения и проводимости нервных стволов.

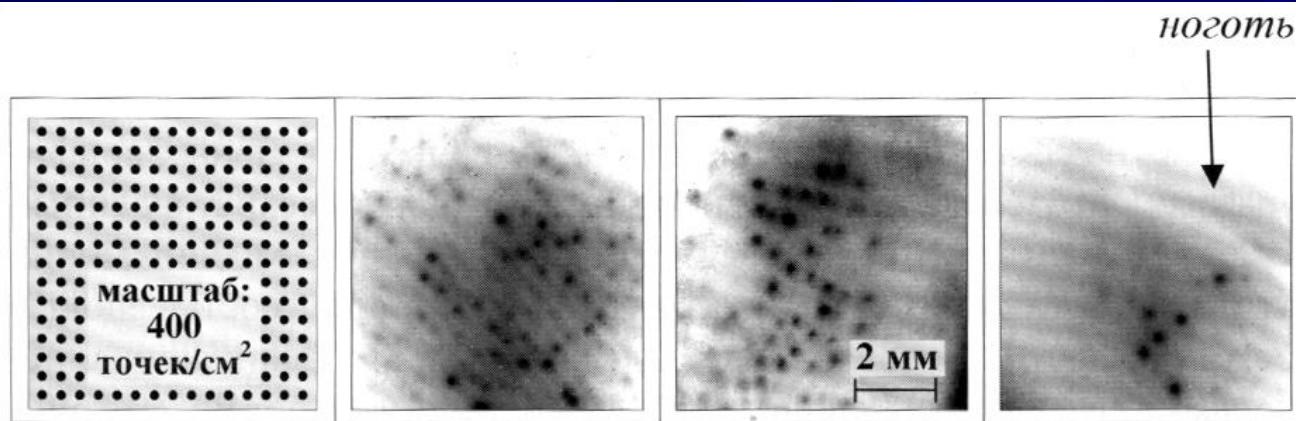
Патологии и особенности перспирации.

Системные интоксикации бытового и производственного характера.

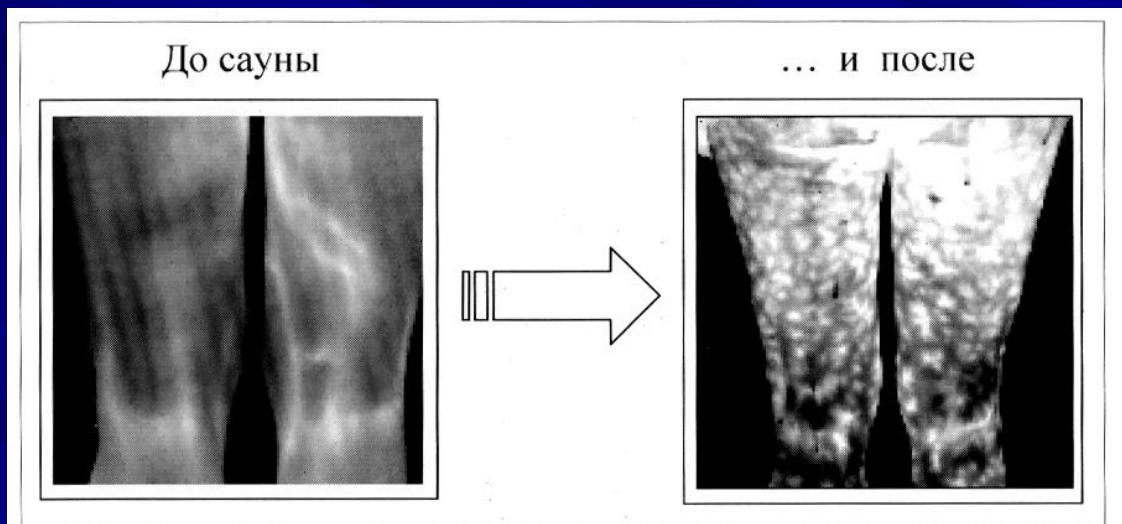
Инфекционные и паразитарные заболевания.

Это уникальные диагностические методики (благодаря термографии), позволяющие выявить патологические процессы не только в момент их манифестации, но и в случае **их скрытого течения**.

Преимущества этого метода заключается прежде всего в том, что термографическая аппаратура **не оказывает никакого воздействия на организм**, она лишь воспринимает инфракрасное излучение с поверхности тела человека и преобразует его в видеоизображение (термографическое изображение).



Термограммы потовых желез подушечек пальцев рук. Пространственное разрешение (56 мкм × 56 мкм) / пиксел. Слева смоделирован фрагмент, характерный для соответствующих участков при однородном распределении активных потовых желез.

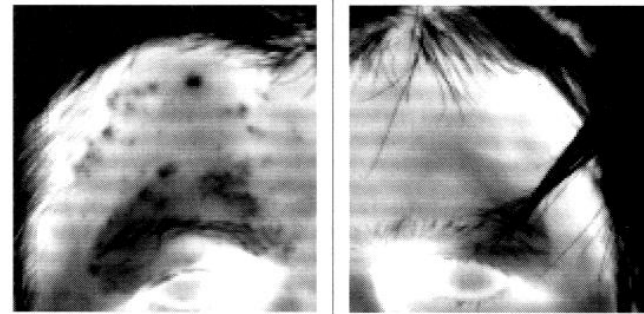


Кардинальное изменение теплового рисунка задней поверхности бедер женщины в результате общей гипертермической нагрузки, созданной с использованием сауны.

10 / 02 / 1997



06 / 12 / 2001



Проявление стабильного точечного гипергидроза у женщины в правой половине лба. Сравнение термограмм, измеренных с временным интервалом около 5 лет.

