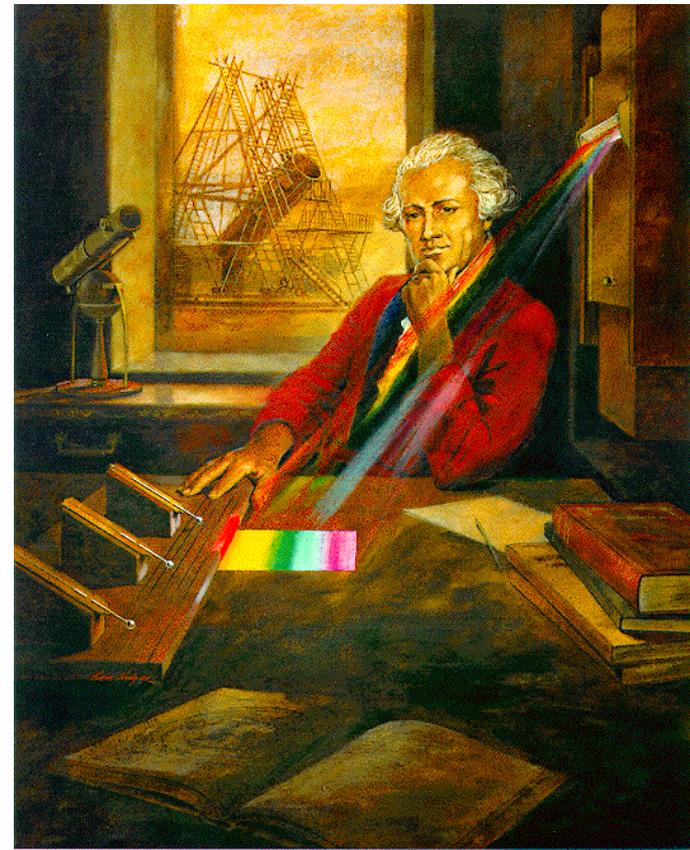


Тепловой контроль

вид НК, основанный на регистрации изменений тепловых и температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами (ГОСТ 18353-79).

Гершель 1800 г.

$$E = \sigma T^4$$



Различают **активный** и **пассивный** способы ТК в зависимости от наличия или отсутствия воздействия внешнего источника энергии. Считается, что активные способы предназначены для обнаружения дефектов и изменений физико-химических свойств объектов, тогда как пассивные способы более пригодны для контроля тепловых режимов и обнаружения отклонений от заданной формы, от заданных теплофизических характеристик материалов и геометрических размеров.

В ГОСТ 23483 вводятся также следующие понятия: **односторонний**, **двухсторонний**, **комбинированный синхронный** и **несинхронный** способы теплового контроля в зависимости от взаимного расположения источника нагрева, термочувствительного элемента и объекта контроля и последовательности контрольных операций.

ТНК

активный

Односторонний

Двусторонний

Комбинированный

Оптический
интерференционный

Прошедшего
теплового излучения

Отраженного
теплового излучения

Конвективный

Электротепловой

пассивный

Эвапорография

Эджеография

Термокрасок

Термобумаг

Термо
люминофоров

Тепловизионный

Пирометрический

Жидких
кристаллов

Калориметрический

Термозависимых
параметров

средства
регистрации
температуры

контактные

(датчики теплового потока,
жидкие кристаллы и др.)

неконтактные

(быстродействующие ИК
термометры и тепловизоры)

Оборудование



КАТРАН

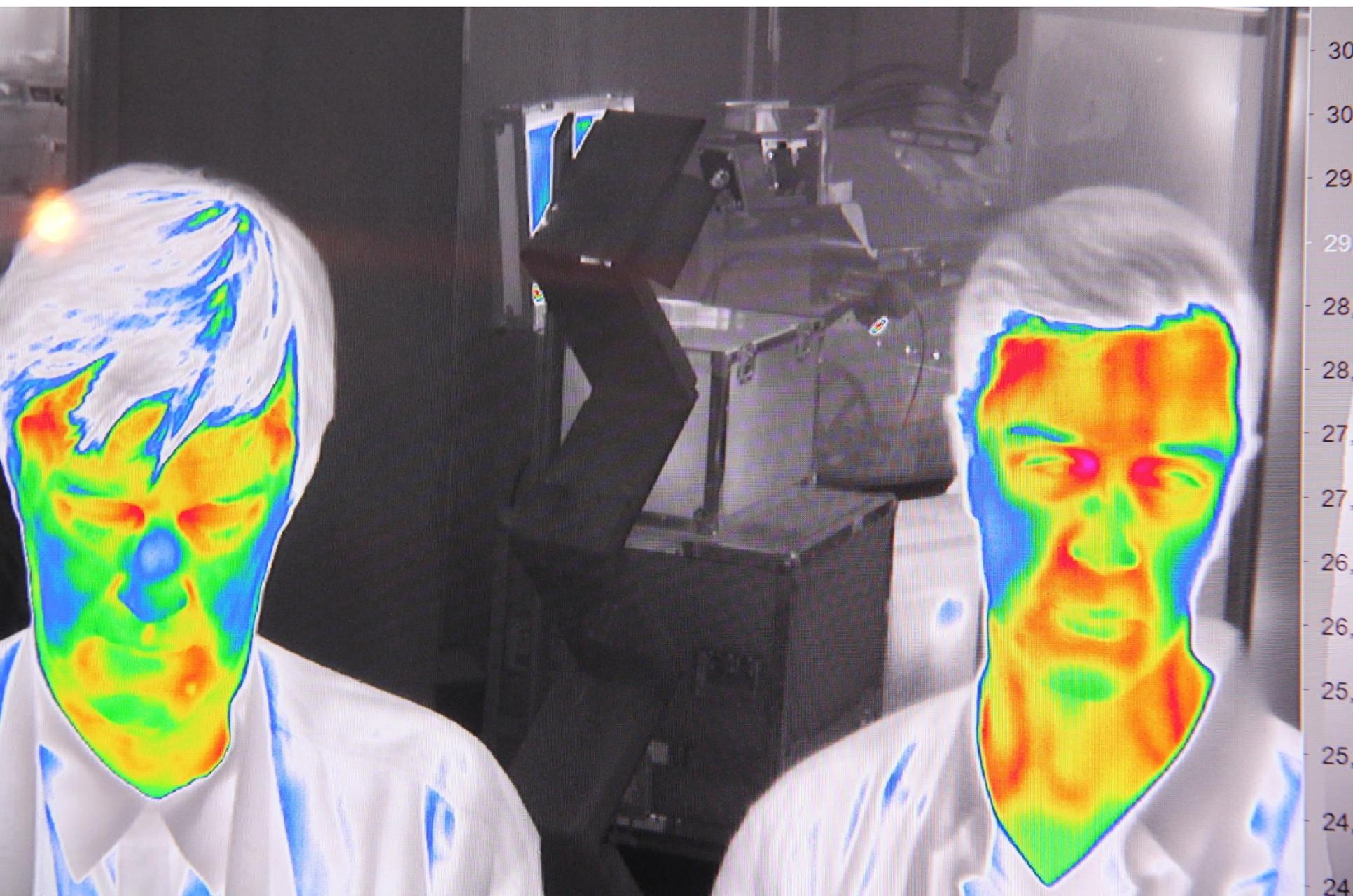


ТН-460МП

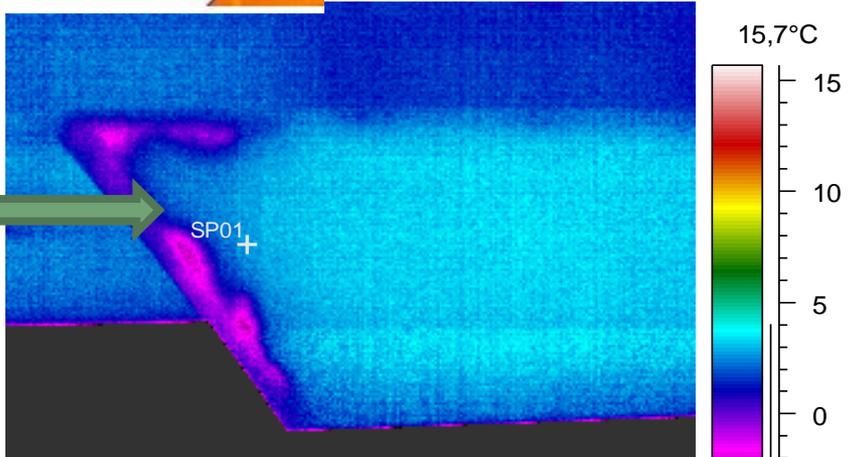
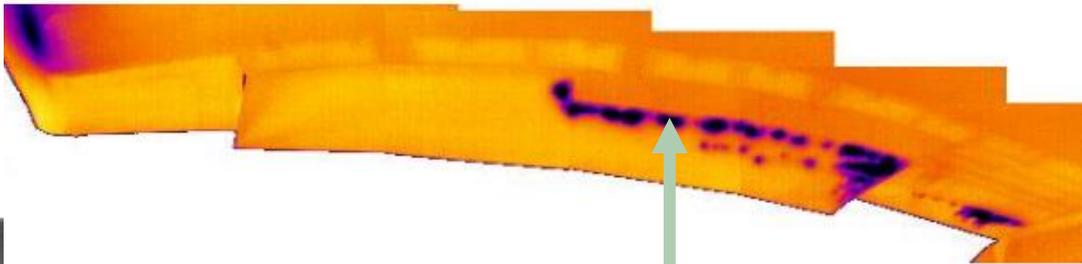


ТН-460МБ

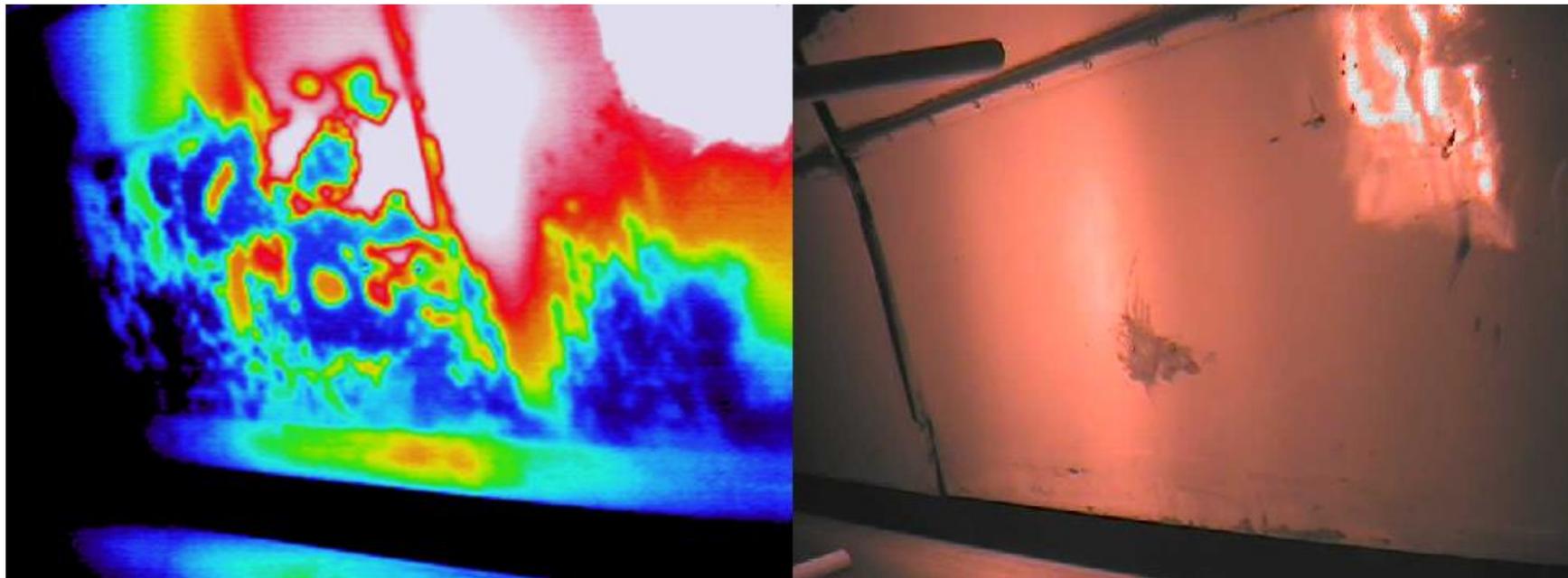
Термограмма

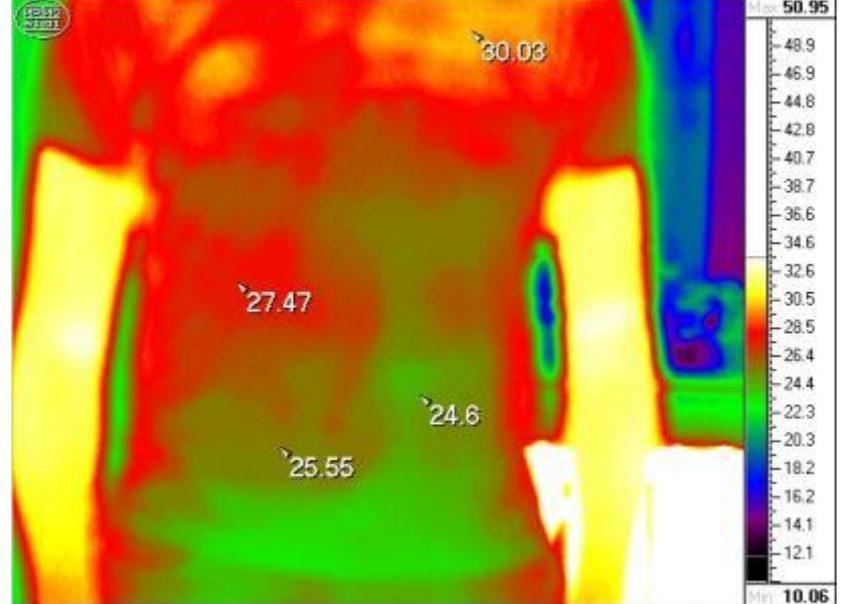
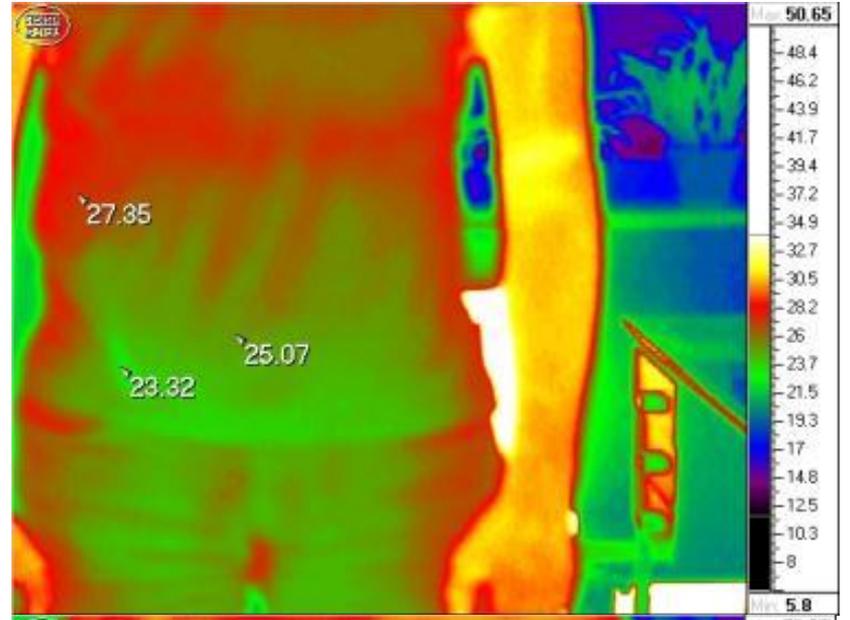
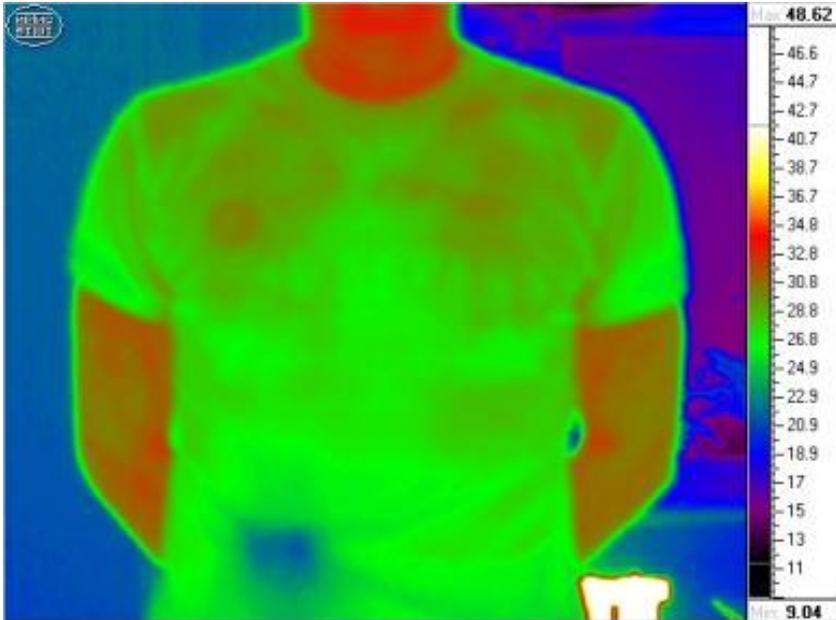


ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЕ ВОДЫ В СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ

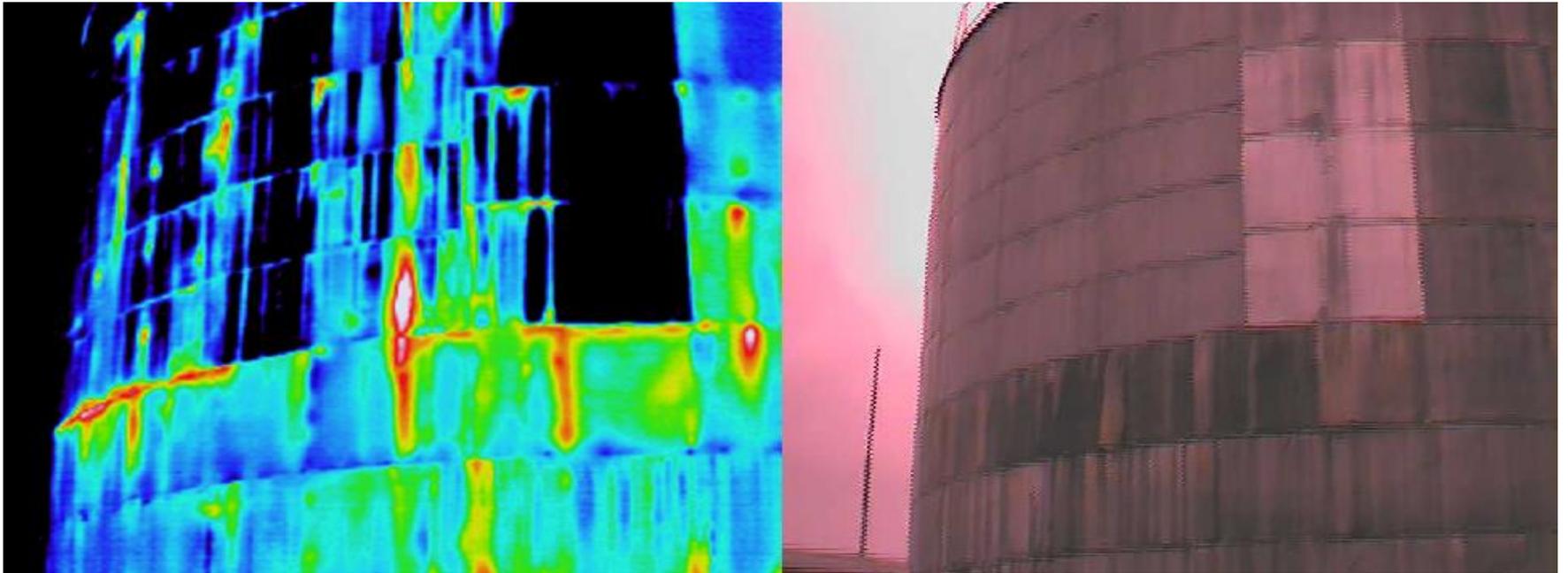


Авиационная техника

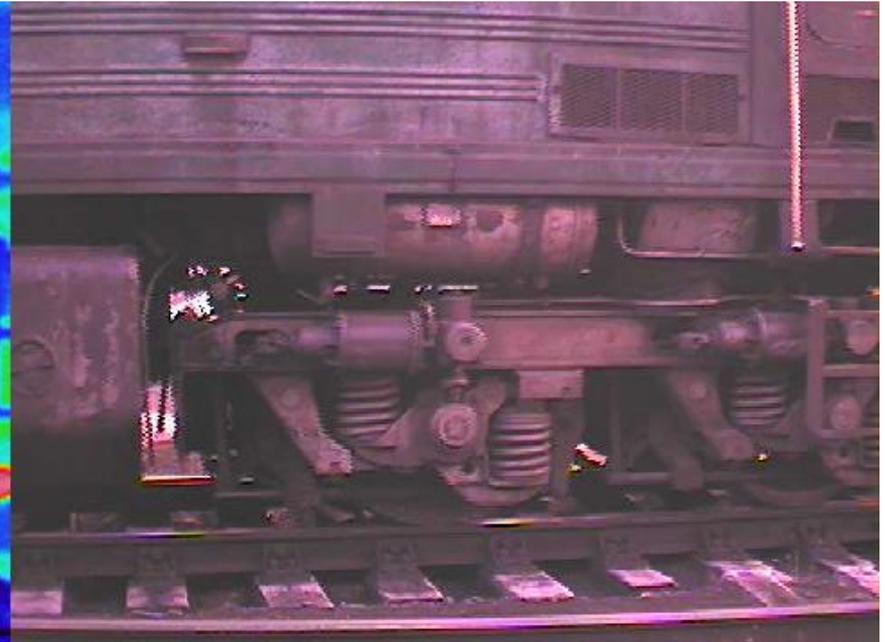
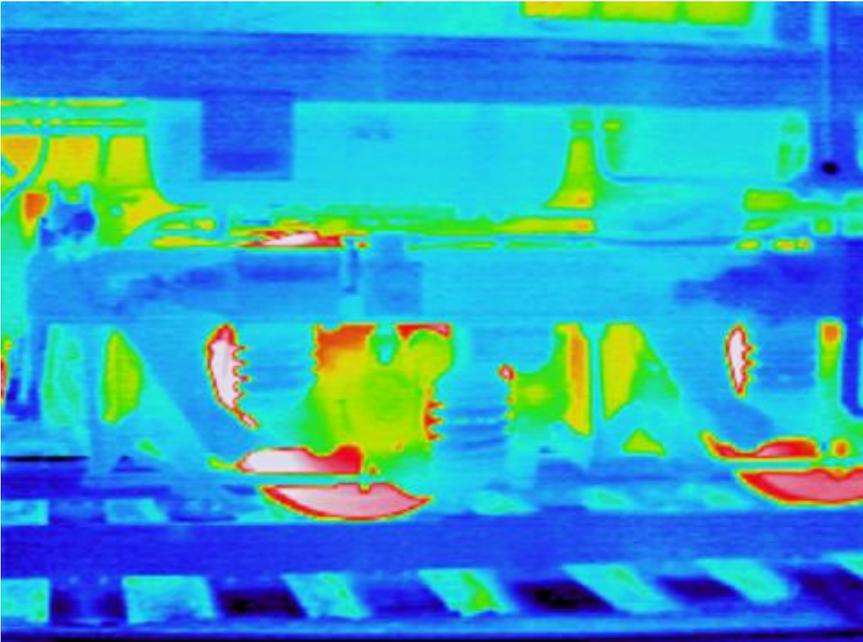




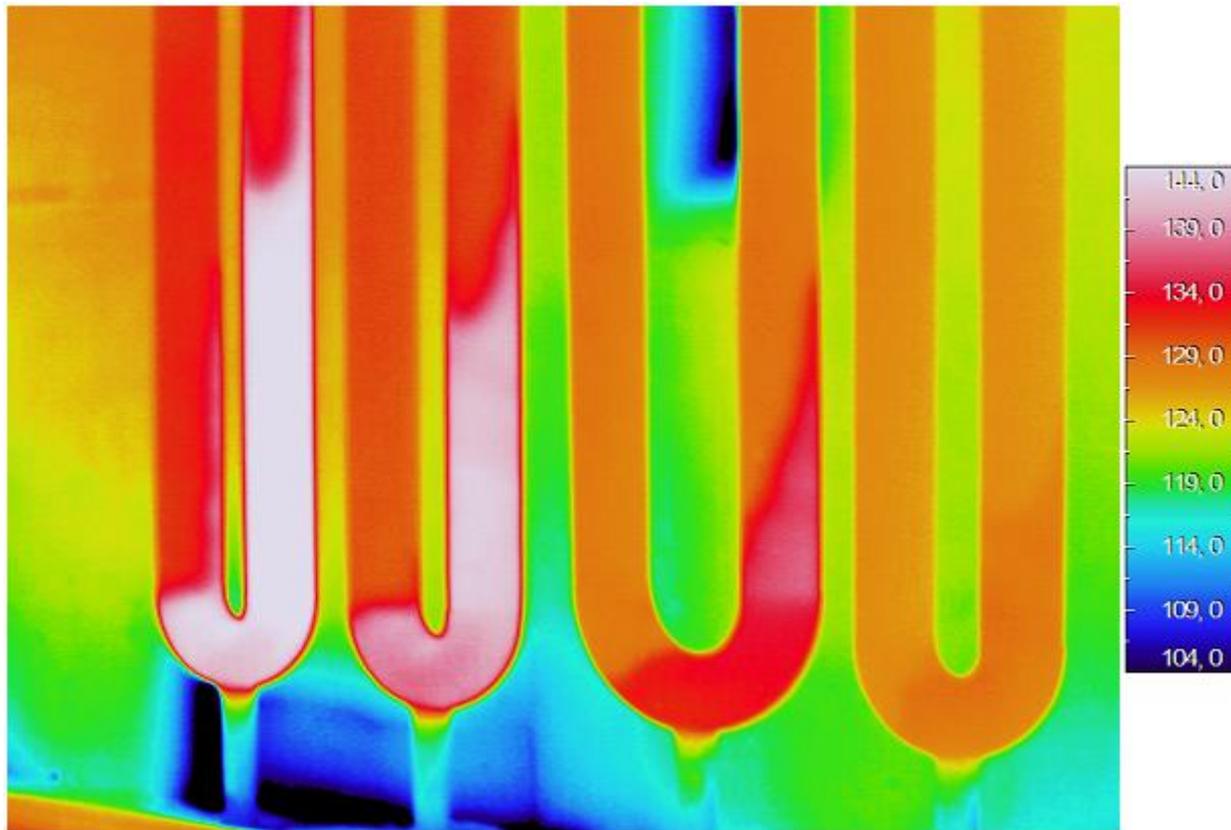
Контроль резервуаров



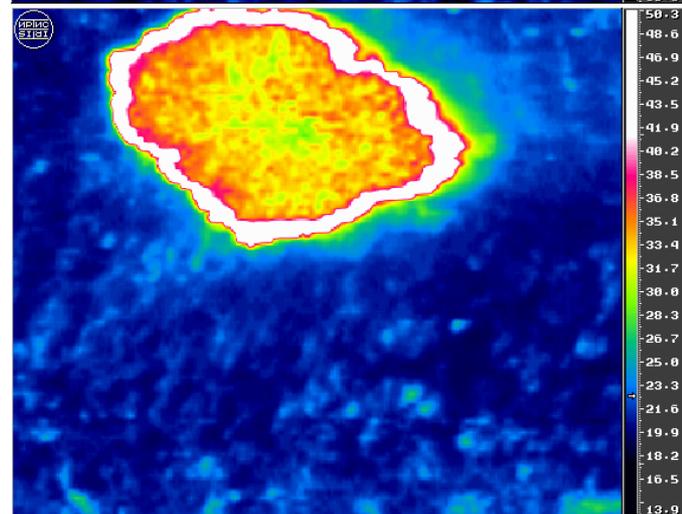
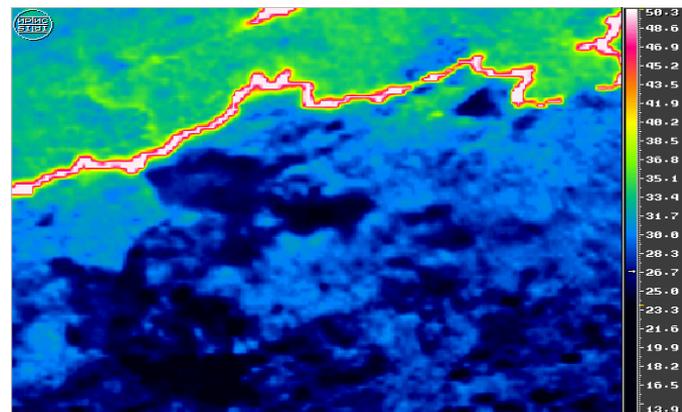
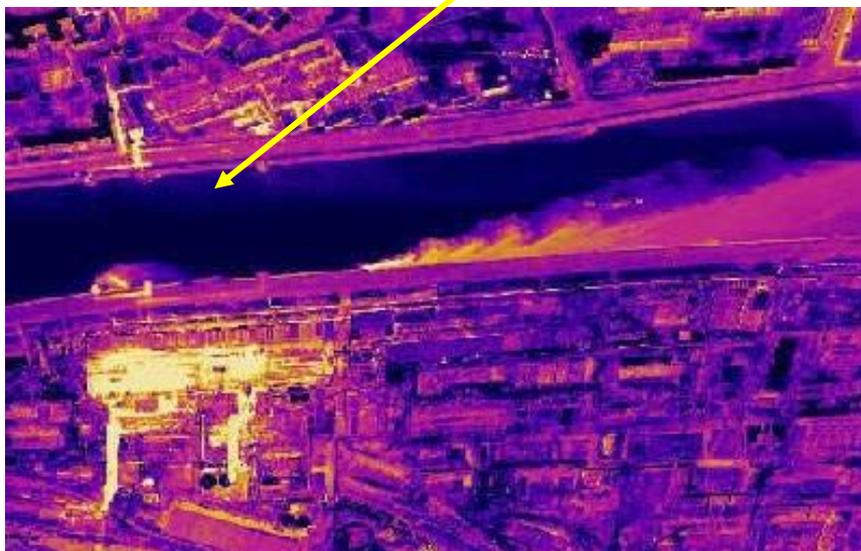
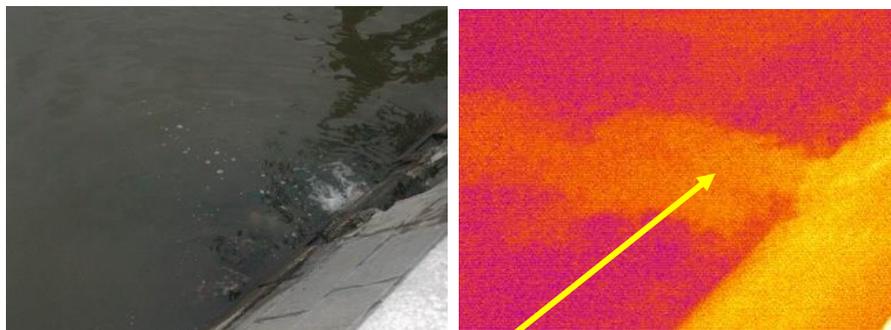
Транспорт включая железнодорожный



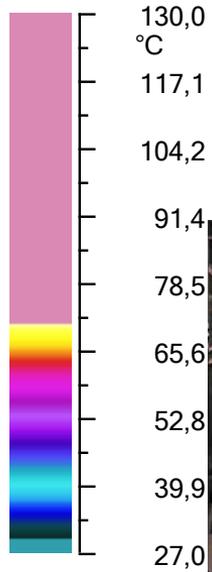
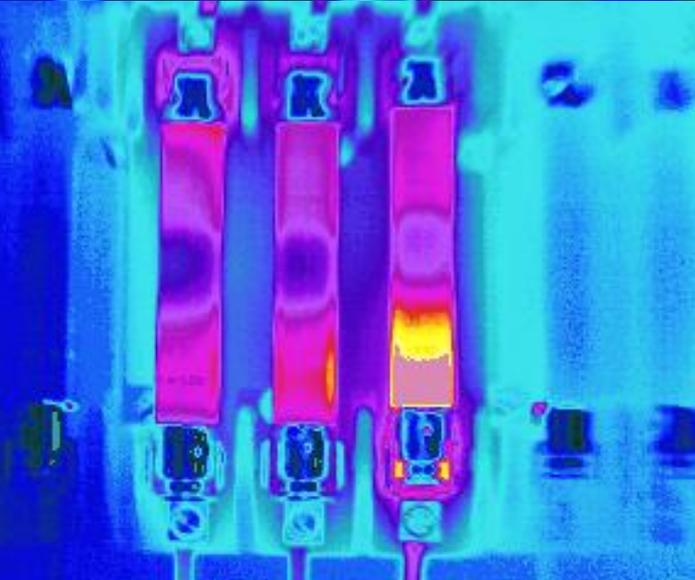
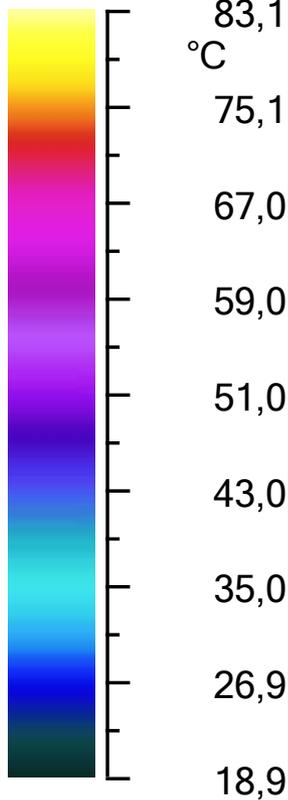
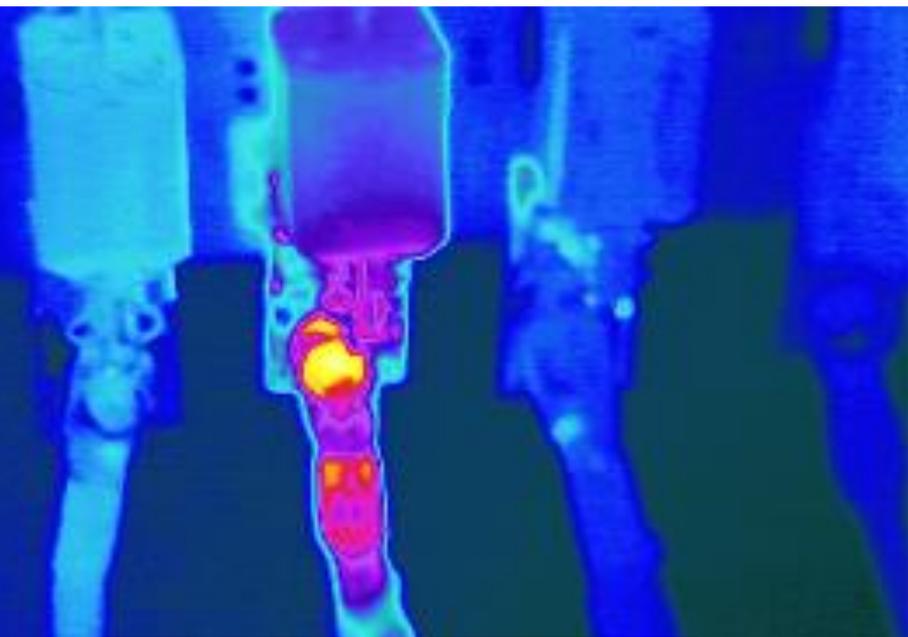
Теплообменники тепловых и энергетических котлов.



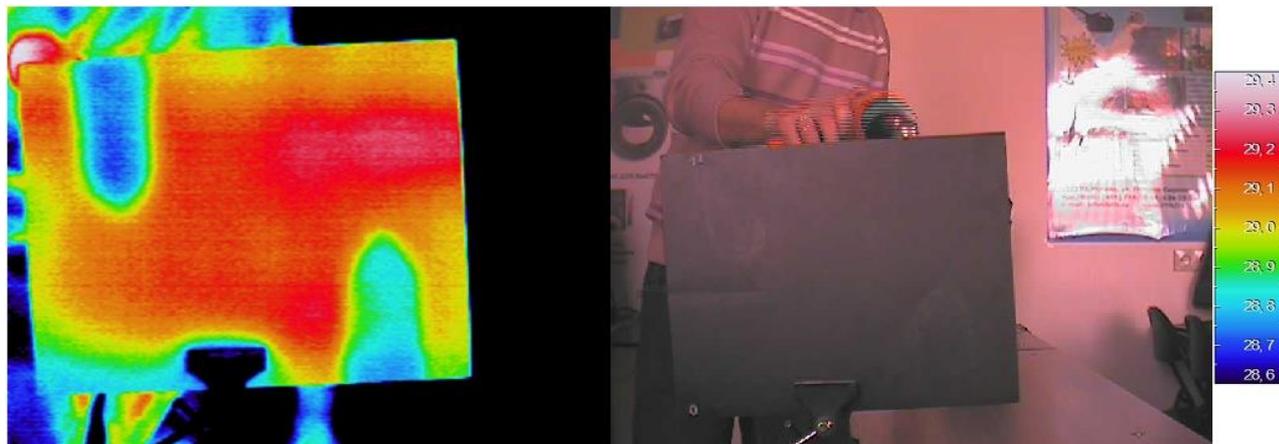
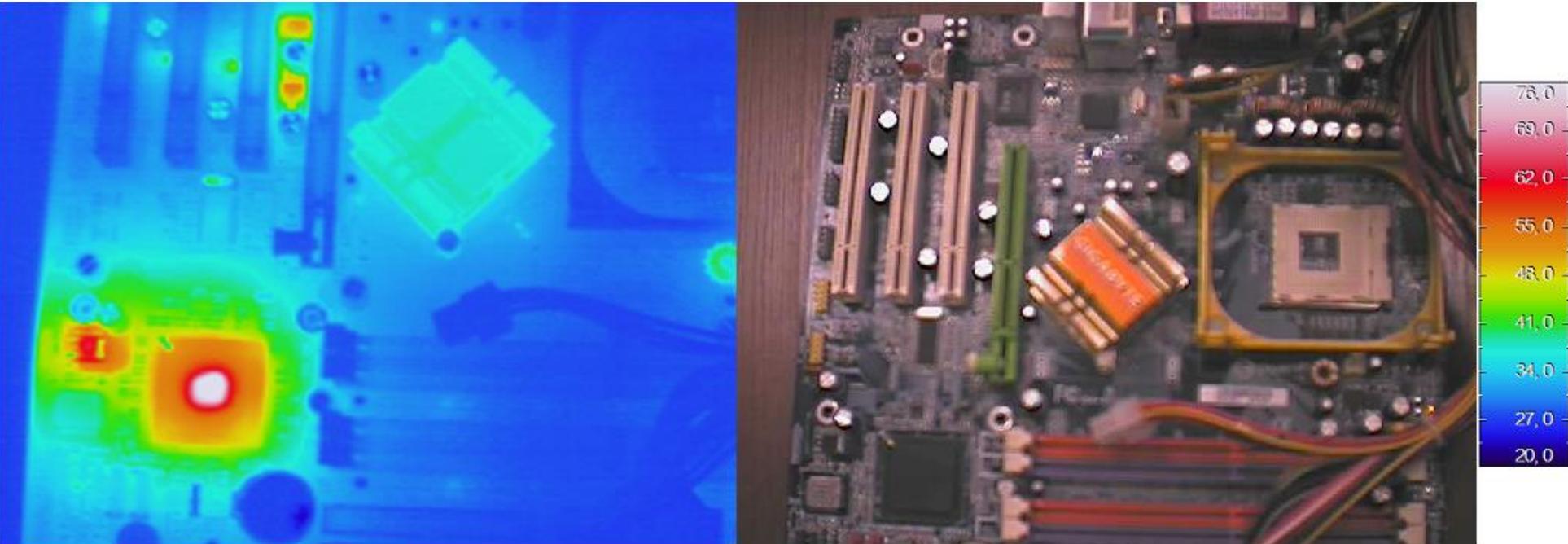
Экологический мониторинг

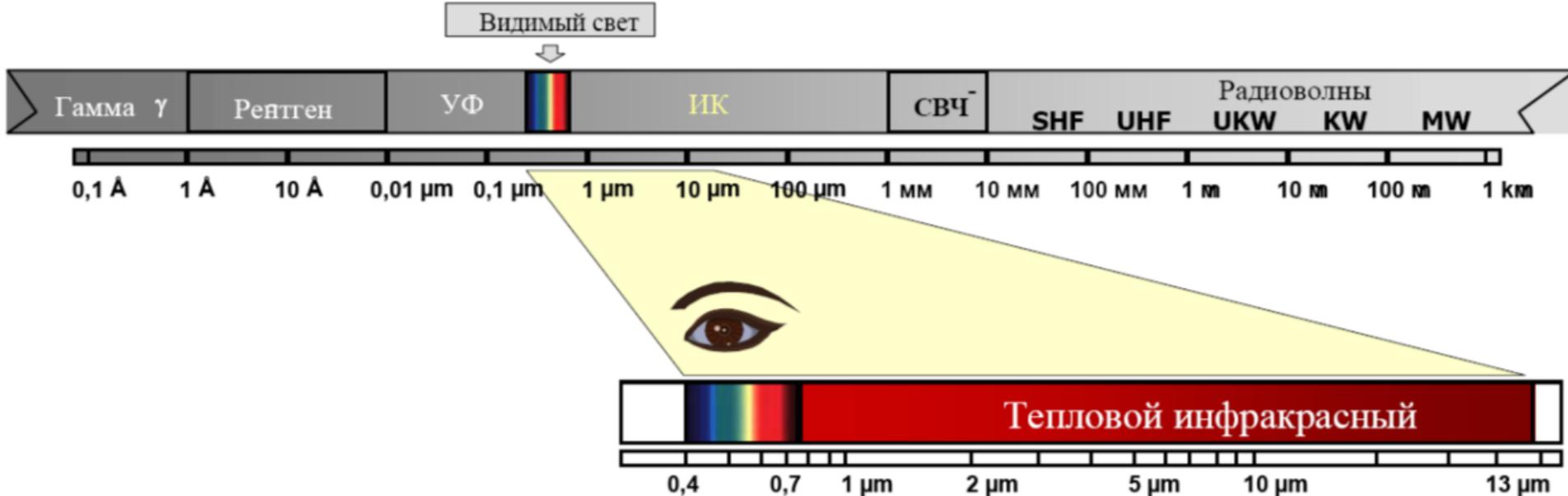


Объекты электрооборудования



Контроль печатных плат и элементов электроники





Температурное поле

совокупность значений температуры во всех точках какой либо пространственной области в данный момент времени.

Тепловизор

устройство для бесконтактного наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности.

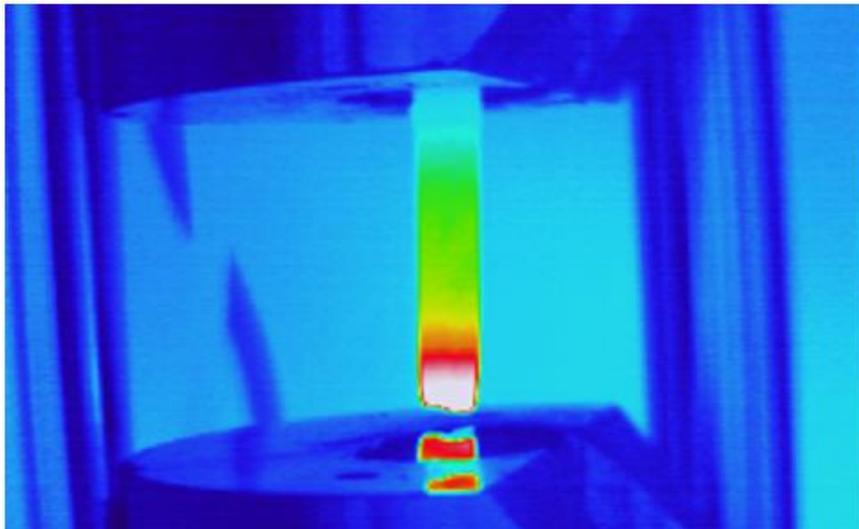
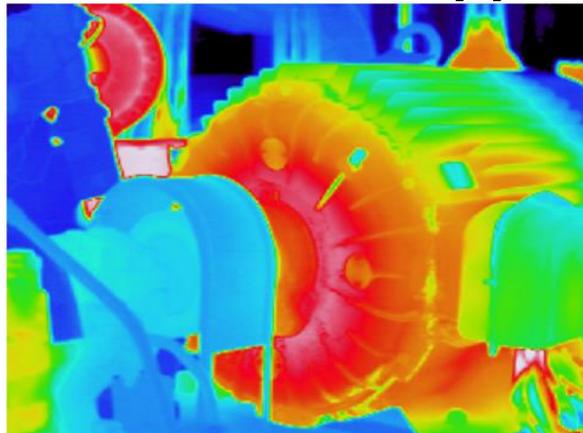
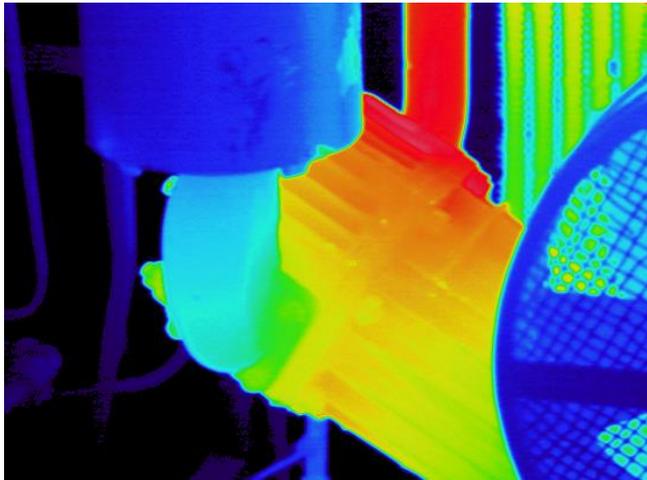
Термограмма

изображение в инфракрасных лучах, показывающего картину распределения температурных полей или распределения плотности теплового излучения.

Количество теплоты Q [Дж (кал)] – энергия передаваемая при тепловом взаимодействии тел.

Калория (кал) – количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1 °С.

$1 \text{ Дж} = 0,2394 \text{ кал.}$



Закон Фурье для стационарного процесса

Где:

- Q – Количество прошедшей тепловой энергии;
- λ – Теплопроводность слоя;
- T1, T2 – Температуры на противоположных поверхностях;
- t – Расстояние между поверхностями;
- F – Площадь поверхности.
- δ – Толщина слоя

$$\Phi_{qs} = \lambda \cdot (T_1 - T_2) \cdot F \cdot t$$

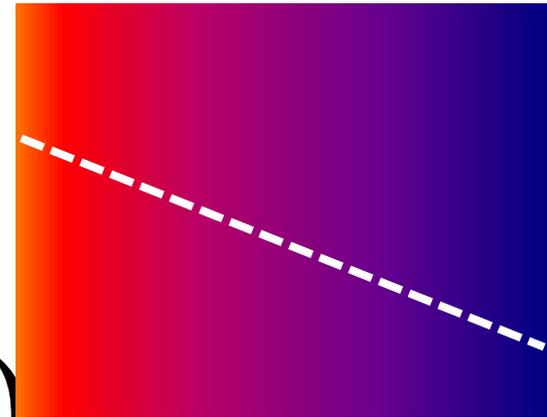
$$Q = cm(T_1 - T_2)$$

Q – Количество переданной тепловой энергии

C – Удельная теплоемкость

m – масса тела

T₁, T₂ – Температура при первом и втором измерении



Конвекция означает перемешивание теплых и холодных слоев жидкости или газа.

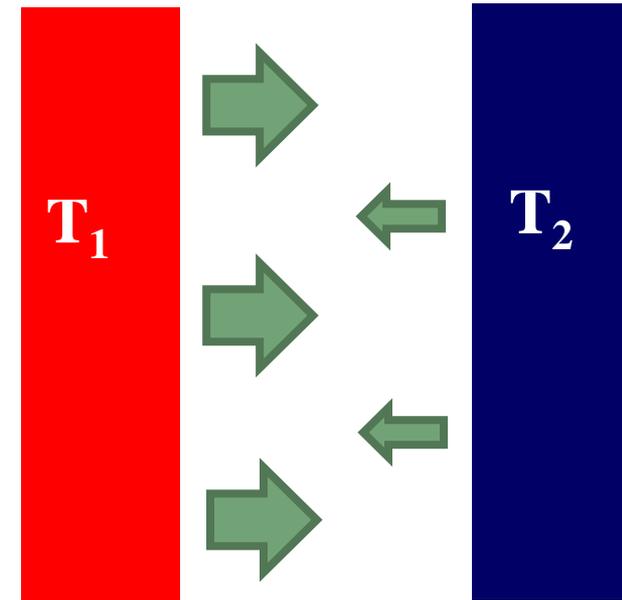
Процесс нагрева(охлаждения) поверхности тела жидкостью или газом описывается законом Ньютона:

$$Q = \alpha_{cv}(T_1 - T_2)$$

α_{cv} - коэффициент конвективной теплоотдачи; T_1 и T_2 - соответственно температуры поверхности тела и среды.

Конвекция - естественная и вынужденная.

Теплопередача путем испускания и поглощения теплового излучения называется радиационным теплообменом.



Физ. основы

ПИ разделяют на два основных класса: **тепловые и фотонные** (фотоэлектрические).

Принцип действия тепловых детекторов основан на одном из четырех явлений:

- 1) болометрическом эффекте (изменение электрического сопротивления чувствительного элемента при нагреве поглощенным ИК-излучением);
- 2) термовольтаическом эффекте (выходное напряжение генерируется нагретым спаем разнородных металлов);
- 3) термопневматическом эффекте (изменение температуры детектора вызывает расширение газового объема);
- 4) пироэлектрическом эффекте (изменение температуры вызывает модуляцию дипольного момента кристаллического чувствительного элемента).

ПИ разделяют на два основных класса: **тепловые и фотонные** (фотоэлектрические).

В фотонных детекторах поглощенные кванты излучения (фотоны) увеличивают число свободных носителей электрического заряда, изменяя электрическое состояние чувствительного элемента.

1. При использовании эффекта **фотопроводимости** поглощенное ИК-излучение изменяет электропроводность чувствительного элемента.
2. В рамках **фотовольтаического** эффекта поглощенное излучение создает электронно-дырочные пары вблизи р–n-перехода, генерируя электрический ток.
3. В меньшей степени в детекторах ИК-излучения используют **фотоэлектромагнитный** эффект.

Параметры ИК-приемников

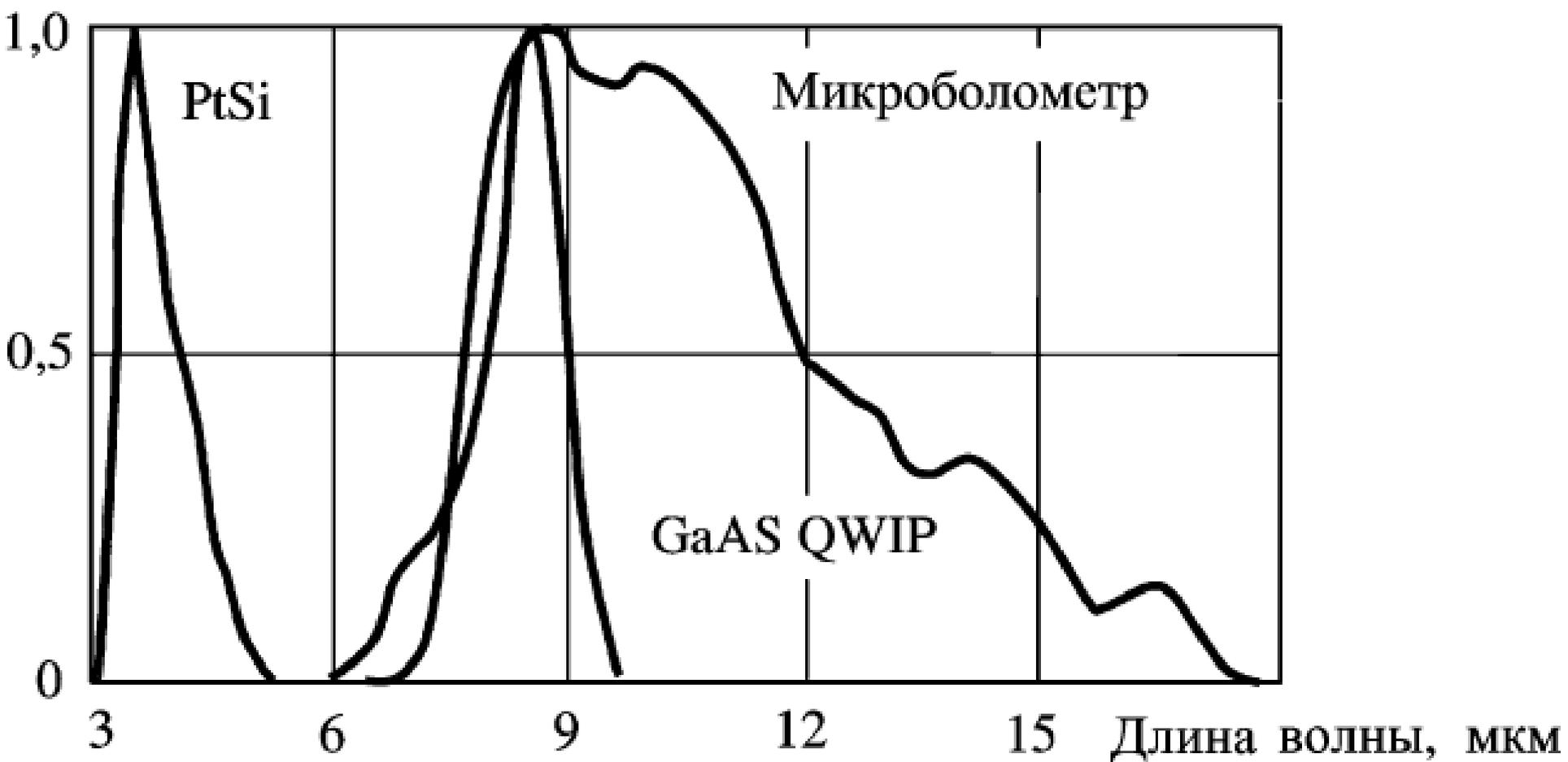
- удельная обнаружительная (детектирующая) способность D^* , см Гц^{1/2}/Вт
- область спектральной чувствительности, мкм;
- интегральная, или вольтовая, чувствительность, определяющая амплитуду электрического сигнала на выходе фотоприемника, В/Вт;
- площадь чувствительного элемента A_d , см²;
- инерционность, или постоянная времени, с.

Удельная обнаружительная способность является спектральной функцией и служит важнейшим критерием качества фотоприемников. $D^* = (A_d \Delta f)^{1/2} / NEP$

где NEP – мощность (поток), эквивалентная шуму;
 Δf – полоса частот, Гц.

Согласно ГОСТ 21934–83 величину NEP называют порогом чувствительности приемника излучения, выражая ее в Вт; в англоязычной литературе эту величину часто выражают в Вт/Гц^{1/2}

Область спектральной чувствительности тепловизоров определяется используемым приемником ИК-излучения. Приборы, работающие в коротковолновом диапазоне, например передающие телевизионные трубки и ЭОПы, могут рассматриваться в качестве тепловизоров, измеряющих относительно высокие температуры.



В ИК-термографии используют преимущественно средне-волновый (3 ... 5,5 мкм) и длинноволновый (7 ... 14 мкм) спектральные диапазоны, что соответствует, с одной стороны, окнам прозрачности атмосферы, а с другой – подкреплено наличием коммерчески доступных приемников излучения, в частности, на основе **InSb** и **CdHgTe**. Кроме того, согласно закону Вина в указанных диапазонах сосредоточена основная мощность излучения тел при температурах от 0 до 100 °С.

В диапазоне всех длин волн от 0 до ∞ поверхностная плотность потока излучения выражается законом Стефана–Больцмана

$$R^{AЧТ}(T, \lambda = 0 \dots \infty) = \sigma T^4 \text{ для АЧТ}$$

$$R(T, \varepsilon, \lambda = 0 \dots \infty) = \varepsilon \sigma T^4 \text{ для серого тела.}$$

Здесь $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Тепловое излучение, плотность потока которого описывается формулами испускается телом в телесный угол зрения π стерадиан. Тепловизор регистрирует часть этого излучения, попадающего в телесный угол Ω согласно закону Ламберта:

$$J_{\Omega} = R \Delta S (\Omega / \pi) \cos \phi ,$$

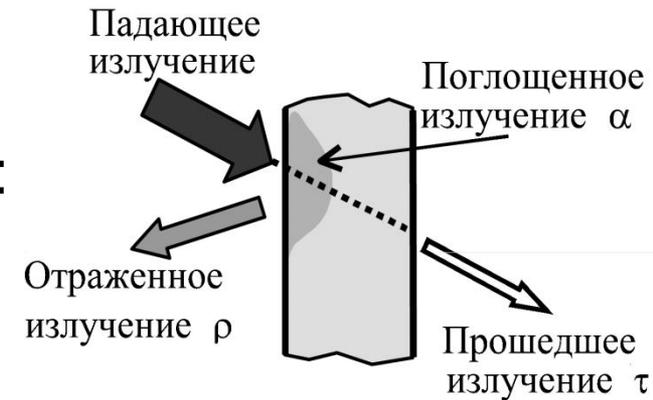
где ΔS – площадь, визируемая тепловизором в пределах его мгновенного угла зрения на поверхности объекта контроля; ϕ – угол между нормалью и направлением телесного угла Ω .

Обе величины ΔS и Ω определяются размерами приемной площадки приемника излучения и параметрами оптического объектива.

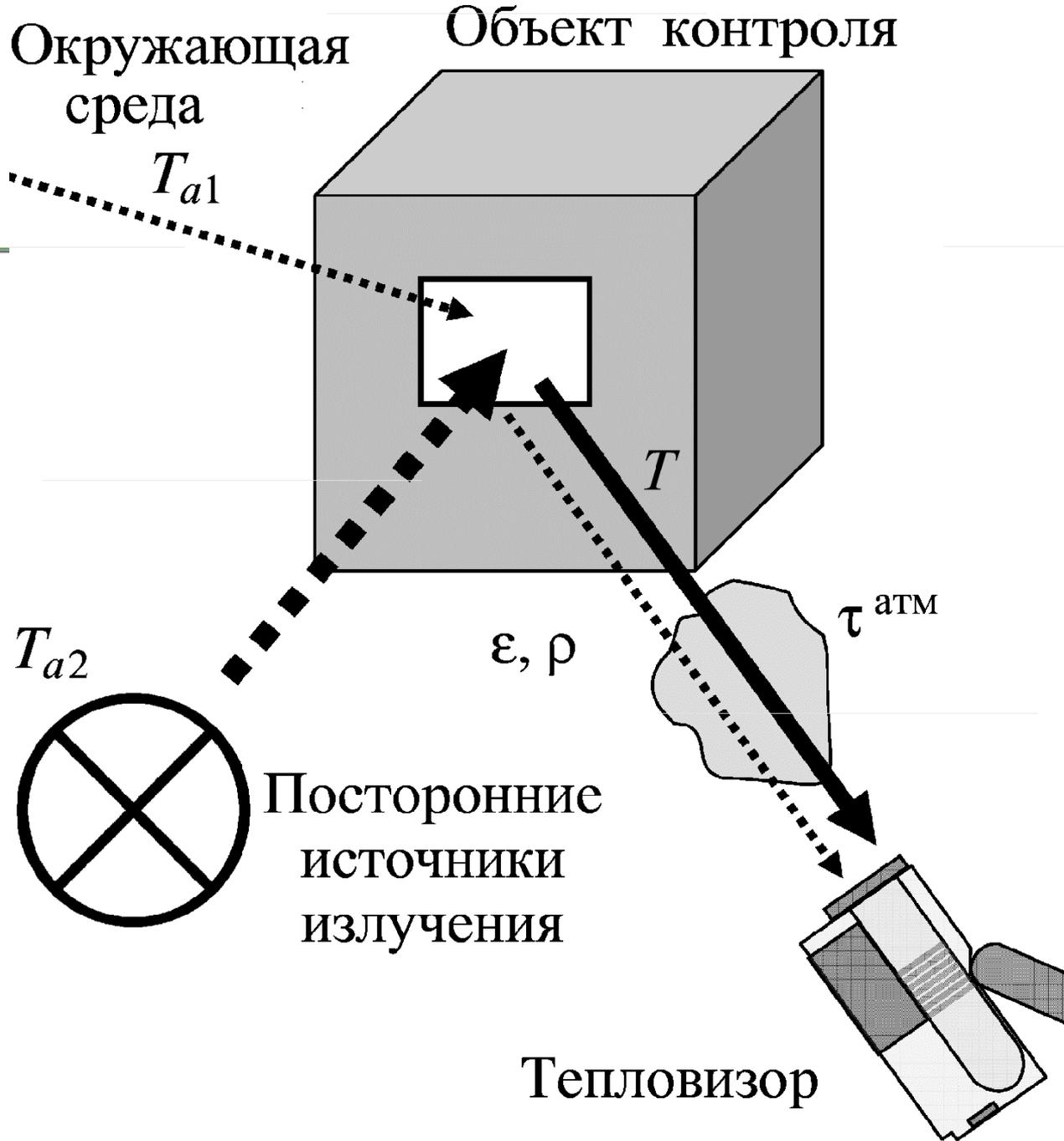
При падении излучения на тело имеют место следующие оптические феномены:

- 1) поглощение с коэффициентом α_{λ} ;
- 2) отражение с коэффициентом ρ_{λ} ;
- 3) пропускание с коэффициентом τ_{λ} .

Очевидно, что на любой длине волны $\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$



Поток излучения, регистрируемый тепловизором, складывается из потока собственного излучения объекта контроля и части потока излучения окружающей среды и посторонних тел, отраженного от поверхности объекта контроля



Простейшей иллюстрацией взаимного влияния объектов друг на друга является случай двух «абсолютно черных» бесконечных плоскостей с температурой T_1 и T_2 , расположенных параллельно друг другу. Результирующий поток излучения в пространстве между ними (без учета поглощения) равен

$$\Delta R = \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Например, если в помещении с температурой 20°C находится человек со средней температурой на поверхности одежды и открытых участках тела 27°C , то собственное излучение человека составит 460 Вт/м^2 . Однако вследствие встречного излучения среды результирующий поток будет всего лишь около 40 Вт/м^2 , что при площади поверхности около 2 м^2 эквивалентно тепловым потерям с поверхности тела человека за счет излучения на уровне 80 Вт .

Взаимодействие тел различной геометрической формы и обладающих различными **коэффициентами излучения** описывается соответствующими коэффициентами Γ и $\epsilon_{\text{эф}}$

Материал	Коэффициент излучения
Резина	0,94
Асбоцементная плита	0,92
Текстолит	0,93
Фторопласт	0,95
Ковровая белая керамика	0,97
Половая глазурованная керамическая плитка	0,91
Алебастр	0,89
Пенополиуретан не гладкий	0,97
Пенополиуретан гладкий	0,98

Изделие	Коэффициент излучения
<p>Резисторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> угольные пленочные металлопленочные остеклованные трубчатые проволочные намотанные 	<p>0,85</p> <p>0,85 ... 0,90</p> <p>0,90</p> <p>0,87</p>
<p>Конденсаторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> переменные электролитические керамические дисковые цилиндрические пленочные слюдяные стеклянные 	<p>0,85 ... 0,95</p> <p>0,28 ... 0,36</p> <p>0,90 ... 0,94</p> <p>0,90</p> <p>0,90 ... 0,93</p> <p>0,90 ... 0,95</p> <p>0,91 ... 0,92</p>
<p>Транзисторы</p>	<p>0,90</p>

Изделие	Коэффициент излучения
Диоды	0,89 ... 0,90
Импульсные трансформаторы	0,91 ... 0,92
Сглаживающие дроссели	0,89 ... 0,93
Платы: из слюды и эпоксидного стекла фторопластовые из эпоксидной фенольной смолы	0,86 0,80 0,80
Пластины: из позолоченной меди из меди, с покрытием припоем	0,30 0,35
Провода: луженые медные с изоляцией на основе формальдегидной смолы	0,28 0,87 ... 0,88
Детали из стеатита для выводов	0,87

Сравнивая характеристики средне- (КВ = 3,5 ... 5 мкм) и длинноволнового (ДВ = 8 ... 14 мкм) каналов, можно констатировать, что:

- КВ-канал обладает более высокой относительной чувствительностью к температурным градиентам;
- ДВ-канал, как правило, характеризуется более высоким температурным разрешением, что особенно важно при термографировании объектов с температурой, близкой к окружающей;
- при полевых съемках отраженное солнечное излучение представляет большую проблему в КВ-канале;

- указанные КВ и ДВ соответствуют окнам прозрачности атмосферы, причем ДВ-окно шире и пропускает больше абсолютной мощности теплового излучения для объектов с температурой окружающей среды;
- в спектральной съемке используют большое число каналов (до 24), что позволяет анализировать разнообразные физические эффекты, которые по-разному проявляются на различных длинах волн; например, в ближнем ИК-диапазоне можно отслеживать созревание сельскохозяйственных культур; спектральный метод используют в аэрокосмической разведке;
- отношение сигналов в двух каналах может быть использовано для снижения влияния излучательной способности на температурные измерения.
идея заключается в формировании отношения сигналов

ДЛИНЫ ВОЛН.

Длина волн (мкм)	Название
0.76-1.5	Ближнее инфракрасное излучение
1.5-5.5	Коротковолновое инфракрасное излучение
5.6-25	Длинноволновое инфракрасное излучение
25-100	Дальнее инфракрасное излучение

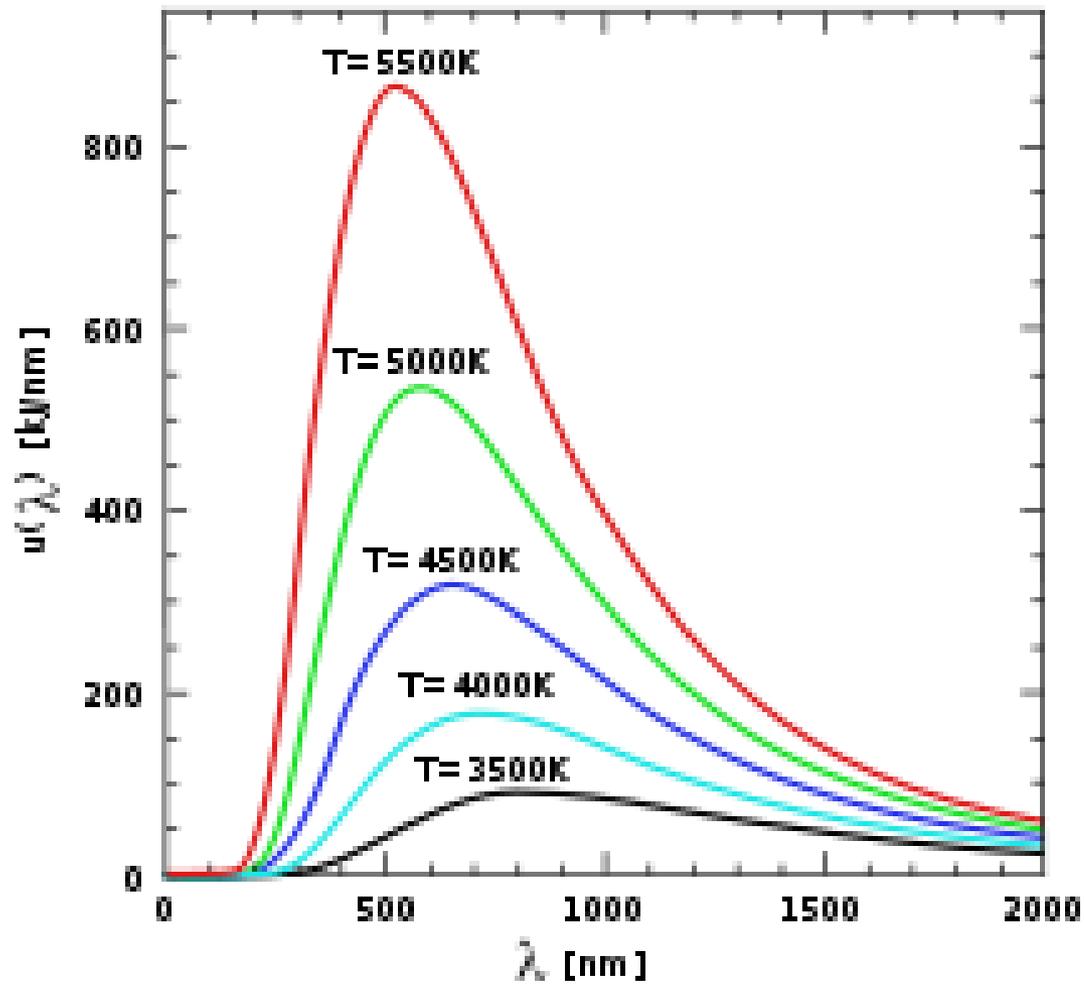
Теплота

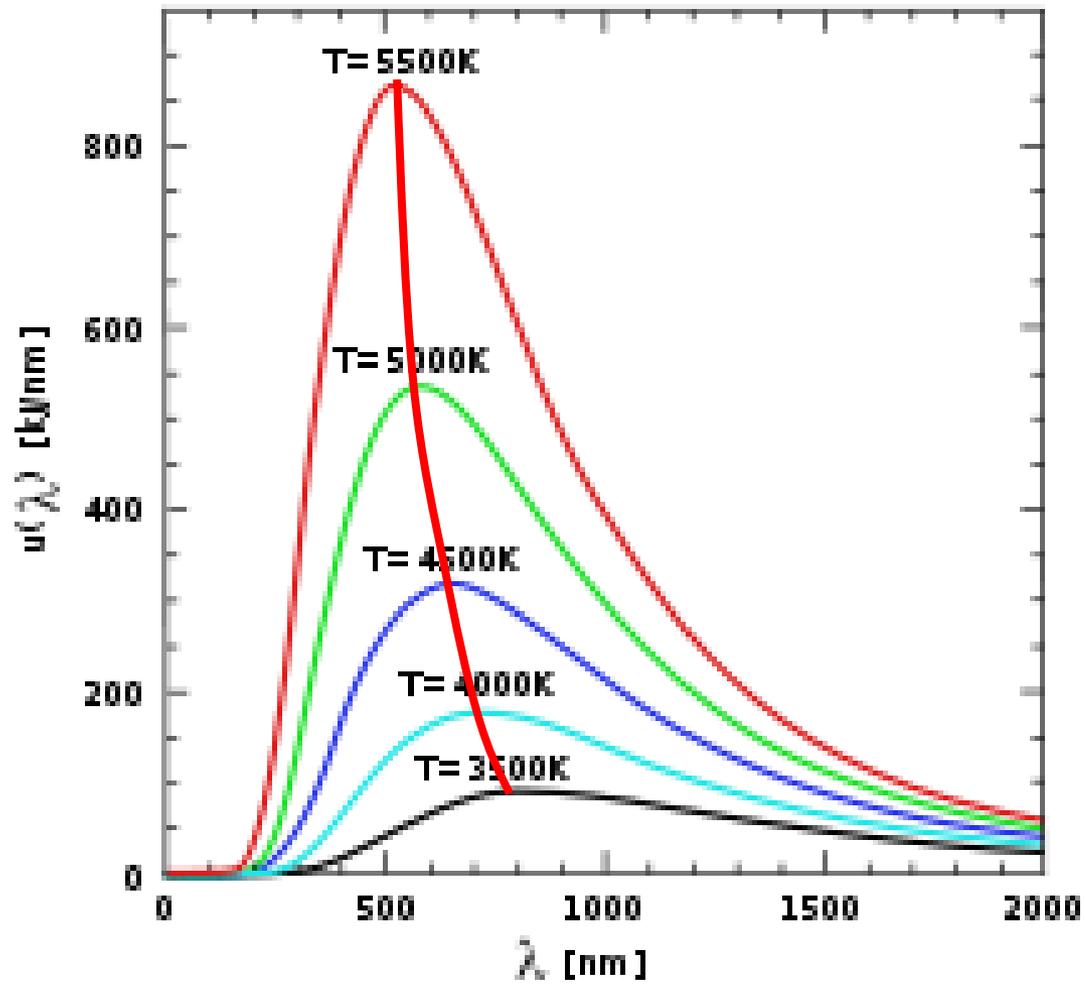
(тепловая энергия) – суммарная кинетическая энергия всех микрочастиц тела.

$$Q = crVT$$

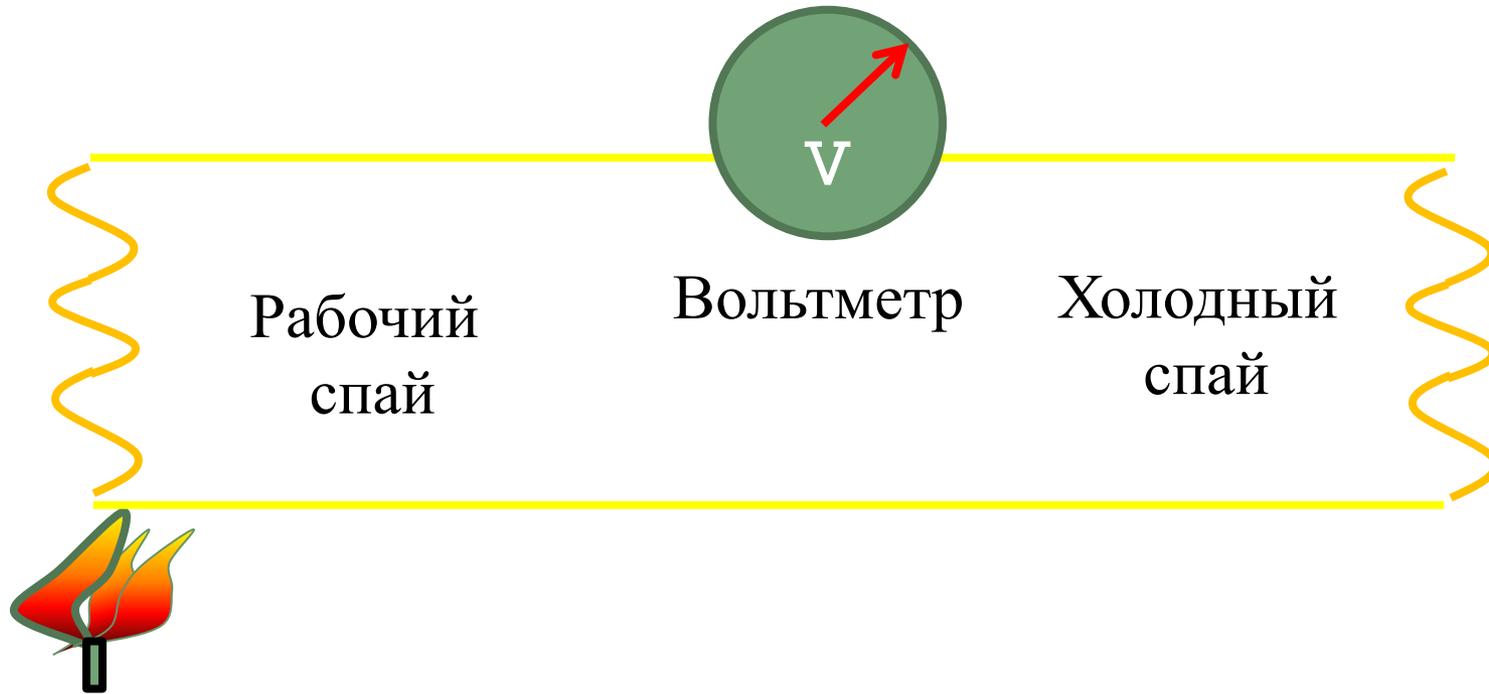
Закон Планка.

$$I(\nu) = \frac{2 h \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$





Термоэлектрическая термометрия



1. Тип К (хромель алюминь) диапазон от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. Тип L (хромель копель) диапазон от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+800\text{ }^{\circ}$
3. Тип E (хромель-константан) диапазон от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Тип T (медь-константан) диапазон от $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$.
5. Тип J (железо-константан) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$..
7. Тип A (вольфраморениевый сплав ВР - вольфраморениевый сплав ВР) диапазон от 0 до $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$
8. Тип N (нихросил-нисил) диапазон от 100 до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Проведение ТК

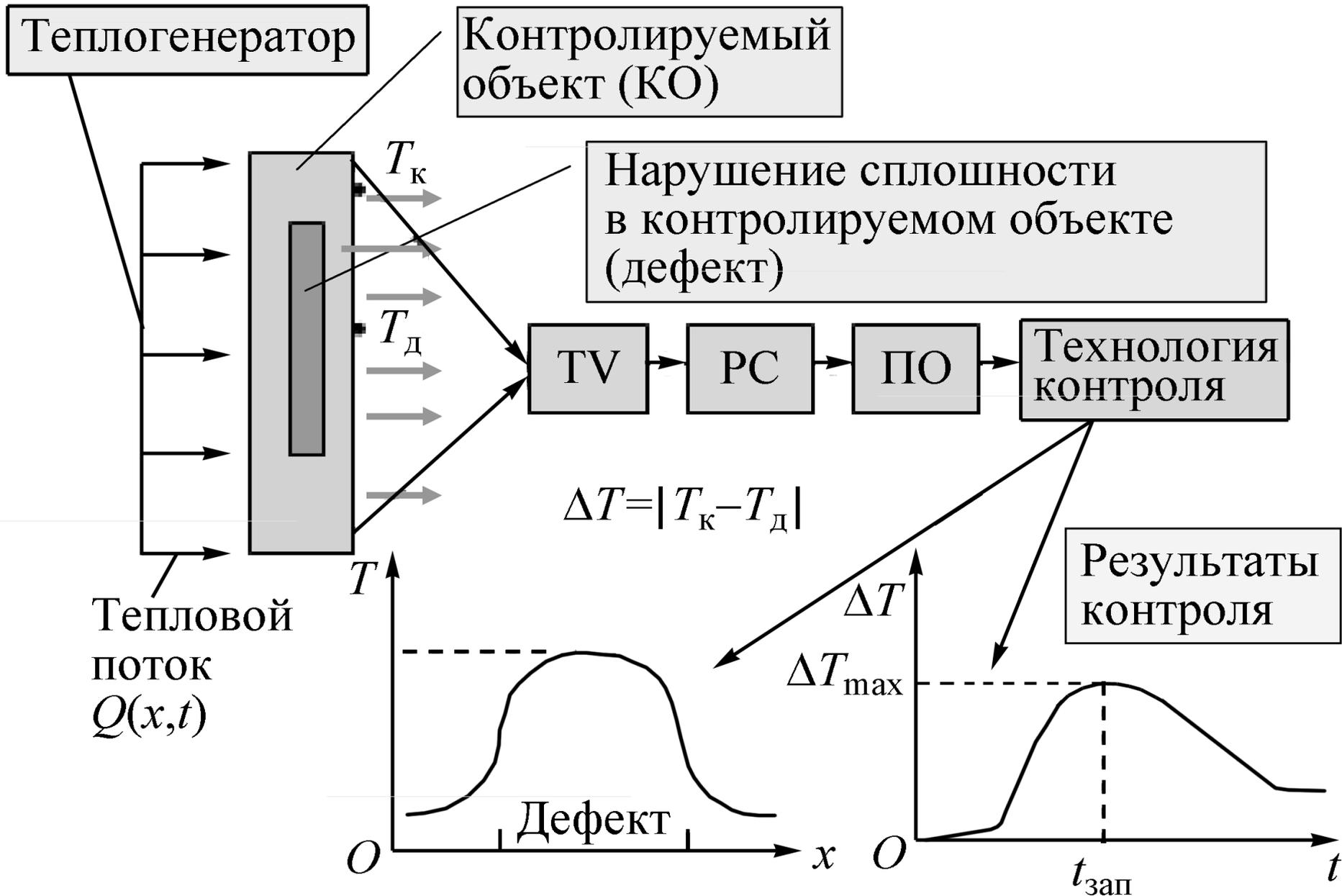
Для того чтобы определить количественные показатели качества контролируемого объекта, например теплотехнические характеристики (ТТХ) и соответствие изделия требованиям нормативных документов в целом, нужно не только получить термограммы, а провести тепловой контроль по соответствующей специально разработанной технологии (методике) контроля, в которой термограммы являются важным, но не единственным этапом. Эти задачи и решает методическое обеспечение, реализованное, как правило, в методике проведения контроля и специальном программном обеспечении, основанном на решении задач теплопередачи через контролируемый объект.

С точки зрения теплового контроля **внутренние дефекты можно разделить на пассивные**, т.е. не выделяющие тепла, и активные, являющиеся источником аномального тепловыделения.

Основные особенности проведения активного ТК:

- 1) локализация температурного перепада в участке над дефектом при отсутствии у него резких границ;
- 2) нестационарный характер температурного поля, выражающийся в наличии момента времени, когда амплитуда перепада максимальна;
- 3) зависимость температурного поля от глубины залегания, раскрытия и площади дефекта при контроле нагреваемой поверхности. Именно эти особенности температурных полей наиболее характерны для процедур ТК.

Обобщенная схема проведения ТК



Электроника Анализ тепловых режимов активных элементов. Контроль пайки, сварки. ИК-термография полупроводников, БИС, дефектов теплоотводов. ИК-влажнометрия; дефекты структуры композитов, готовых панелей, клеевых и других соединений, защитных покрытий, контроль теплового режима радиоэлектронной аппаратуры, пирометрия.

Диагностика состояния эффективности работы систем охлаждения, определение дефектных зон термоизоляции.

Машиностроение Контроль тепловых режимов работы машин, механизмов, дефектоскопия деталей, узлов; обнаружение и распознавание внутренних нарушений сплошности в изделиях различных форм (в том числе из полимерных и композитных материалов). Обнаружение дефектов в соответствии с нормативной документацией при температуре до 450 °С, контроль технического состояния крупных тепловыделяющих объектов печей, котлов, воздухопроводов, дымоходных труб и т.п. в процессе их эксплуатации, распределения и динамики изменения температурных полей

Достоинства метода

- 1) широкий диапазон рабочих температур контролируемых объектов;
- 2) контроль действующего оборудования при эксплуатационных нагрузках;
- 3) возможность проведения контроля в различных климатических условиях, при отрицательной температуре окружающей среды, пониженном давлении, в вакууме;
- 4) возможность контроля быстроперемещающихся объектов, например контроль листового проката при его движении со скоростью до 2 ... 4 м/с, контроль электрооборудования метрополитена, железнодорожного транспорта и т.п.;
- 5) малые габариты и масса аппаратуры ТК, мобильность аппаратуры;
- 6) преимущество автоматизированных систем ТК по параметрам цена/функциональные возможности по сравнению с УЗ-системами аналогичного назначения;
- 7) возможность контроля большой номенклатуры материалов (металлов, пластмасс, полимерных материалов, биметаллов, строительных материалов и т.д.) с различными формами поверхности (плоскость, цилиндр и т.д.) без существенной перенастройки аппаратуры;
- 8) сравнительно низкие требования к качеству поверхности контролируемого материала;
- 9) экологическая безопасность.