

Дмитриев В.Е.

Студент магистратуры

*1 курс, факультет «Проектирование и технология производства
электронной аппаратуры»*

Московский Государственный Технический Университет

имени Н.Э.Баумана

Россия, г. Москва

Попов Д.В.

Студент магистратуры

*1 курс, факультет «Проектирование и технология производства
электронной аппаратуры»*

Московский Государственный Технический Университет

имени Н.Э.Баумана

Россия, г. Москва

ОСНОВЫ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Аннотация: Статья посвящена изучению свойств инфракрасного излучения, испускаемого объектами. В инфракрасной термографии эта особенность используется в нескольких целях: как идентификатор состояния здоровья организма, признак неисправности в механических или электрических узлах, либо в качестве показателя потери тепла в помещениях. Приведены общие понятия инфракрасной термографии, процедуры измерения температуры и неразрушающего теплового контроля. Кроме того, представлены новейшие достижения в данных областях науки и техники.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, термография, измерение температуры, неразрушающий тепловой контроль.

Annotation: The article is devoted to the study of the properties of infrared radiation emitted by objects. In infrared thermography, this feature is used for several

purposes: as an identifier of the state of health of the body, a sign of malfunction in mechanical or electrical nodes, or as an indicator of heat loss in rooms. General concepts of infrared thermography, temperature measurement procedures and non-destructive thermal control are given. In addition, the latest achievements in these fields of science and technology are presented.

Key words: *infrared radiation, thermography, temperature measurement, non-destructive thermal control.*

Инфракрасное излучение – это энергия, излучаемая поверхностью объекта, температура которого выше абсолютного нуля. Испускаемое излучение зависит от температуры материала; чем выше температура, тем больше интенсивность излучаемой инфракрасной энергии.

Существует три способа, с помощью которых лучистая энергия, поражающая объект, может рассеиваться: поглощение, передача и отражение. Фракции полной лучистой энергии, связанные с каждым из этих режимов диссипации, называются поглощательной способностью, пропусканием и отражательной способностью тела. Для описания этих явлений используются три параметра: спектральное поглощение α_λ , которое представляет собой отношение поглощаемой объектом спектральной излучающей способности, спектральную отражательную способность ρ_λ , которая представляет собой отношение спектральной излучающей способности, отраженной объектом, и спектральную коэффициент пропускания τ_λ , который является отношением спектральной мощности излучения, передаваемой объектом. Эти три параметра зависят от длины волны. Сумма этих трех параметров должна быть равна единице на любой длине волны и описывается в уравнении (1):

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (1)$$

В случае непрозрачных материалов уравнение (1) можно упростить (2), если допустить, что вся поступающая энергия поглощается или отражается. Можно также сказать, что поступающая энергия, которая не поглощается – отражается.

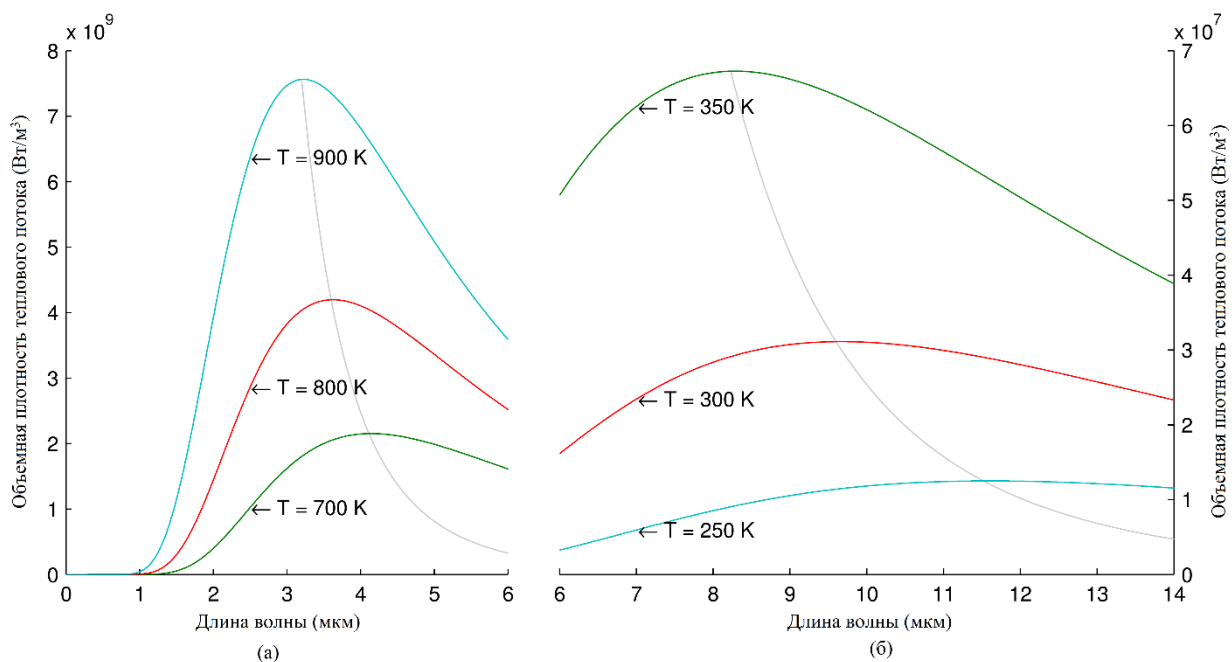
$$\alpha_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad (2)$$

Материалы, в которых пропускательная и отражательная способности – нулевые, называются черными. В этих материалах вся лучистая энергия поглощается ($\alpha_{\lambda} = 1$).

Электромагнитное излучение, излучаемое черным телом ($W_{\lambda b}$), может быть рассчитано по закону Планка, уравнение (3), где C_1 и C_2 - константы, λ - длина волны, а T - температура. Результатом закона Планка является мощность, излучаемая на единицу площади на единицу длины волны, которая является функцией λ и T .

$$W_{\lambda b} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3)$$

На рисунке 1 показано распределение электромагнитного излучения, излучаемого черным телом при разных температурах. Кривые показывают, сколько энергии излучается на каждой длине волны. Как видно, пик кривой для более горячего объекта больше. Кроме того, существует обратная зависимость между температурой и длиной волны пика излучения.



а - объекты с высокой температурой;

б - объекты с низкой температурой

Рисунок 1 – Электромагнитное излучение черного тела в тепловом равновесии при определенной температуре

Длина волны электромагнитного излучения зависит от температуры объекта; чем выше температура, тем короче длина волны. Распределение аналогично, но длина волны смещается. Пиковая длина волны для определенного значения температуры может быть рассчитана по закону Вина, уравнение (4). Закон Вина получается путем дифференцирования закона Планка (3) по λ и нахождения максимальной интенсивности излучения.

$$\lambda_{peak} = \frac{0,0029}{T} \quad (4)$$

Чтобы получить полную интенсивность полусферического излучения черного тела, уравнение (3) интегрируется по всем длинам волн (λ от нуля до бесконечности), получая уравнение (5), где σ - постоянная. Это называется законом Стефана-Больцмана.

$$W_b = \sigma \cdot T^4 \quad (5)$$

Коэффициент излучения тела формально определяется для длины волны λ уравнением (6), как отношение энергии излучаемой телом к излучению, которое излучается черным телом при той же температуре.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda b}} \quad (6)$$

Реальное тело излучает только часть тепловой энергии, излучаемой черным телом при той же температуре. Если излучательная способность постоянна и не зависит от длины волны, тело является серым. Таким образом, его излучательную способность можно выразить уравнением (7):

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda b}} = \frac{W}{W_b} = \varepsilon \quad (7)$$

Излучательная способность реальных объектов не является постоянной и не зависит от длины волны; таким образом, они не могут считаться серыми телами. Однако обычно предполагается, что для коротковолновых интервалов излучательную способность можно рассматривать как константу. Это предположение используется для обработки реальных объектов в виде серых тел. Таким образом, хотя излучательная способность реальных объектов зависит от длины волны, и поэтому они не могут

считаться истинными серыми телами, они рассматриваются как таковые, усредняя их излучательную способность через короткие интервалы, в которых работает инфракрасный датчик. Это утверждение справедливо, поскольку излучательная способность является медленно меняющейся функцией длины волны для твердых объектов. Однако это не относится к другим объектам, таким как газы или жидкости.

Подставляя (7) в (5), получаем уравнение (8).

$$W_b = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (8)$$

Это уравнение называется законом Стефана-Больцмана для излучения серого тела. На рисунке 2 показано графическое представление этой формулы для разных коэффициентов излучения.

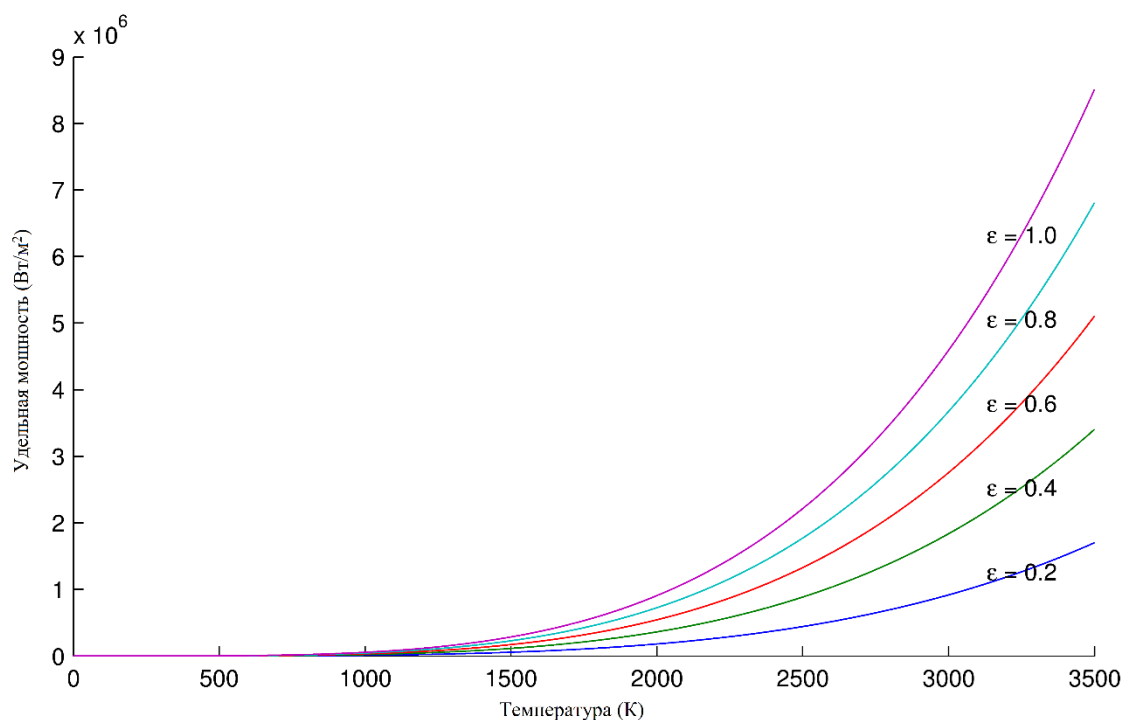


Рисунок 2 – Закон Стефана-Больцмана

Если вся энергия излучения, падающая на объект, поглощается (нет передачи или отражения), поглощательная способность равна единице. При постоянной температуре вся поглощаемая энергия должна быть повторно излучена, чтобы излучательная способность такого тела была равна

единице. Поэтому поглощательная способность в черном теле равна излучательной способности, которая равна единице. В общем, согласно закону Кирхгофа, излучательная и поглощательная способности любого материала равны при любой заданной температуре и длине волны. Это можно выразить уравнением (9):

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad (9)$$

Соответственно из уравнений (2) и (9), для непрозрачных материалов, получаем уравнение (10):

$$\rho_{\lambda} = 1 - \varepsilon_{\lambda} \quad (10)$$

Серые тела излучают только часть тепловой энергии, излучаемой эквивалентным черным телом, поэтому излучательная способность в этих телах всегда меньше единицы, а отражательная способность больше нуля.

Электромагнитный спектр делится на несколько областей или полос по длине волны. Инфракрасная область приблизительно определяется от 0,8 до 1000 мкм, то есть от конца видимого света до микроволн.

Большая часть инфракрасного диапазона электромагнитного спектра не полезна в ИТ, поскольку она блокируется атмосферой. Остальные части определяют полезную часть инфракрасной области ИТ:

- Ближний инфракрасный (БИ) от 0,8 до 1,7 мкм.
- Коротковолновый инфракрасный (КИ) от 1 мкм до 2,5 мкм.
- Средневолновой инфракрасный (СИ) от 2 мкм до 5 мкм.
- Длинноволновый инфракрасный (ДИ) от 8 мкм до 14 мкм.

Среди всех областей СИ и ДИ наиболее часто используются в ИТ. Существует две причины: полоса пиковых выбросов и коэффициент пропускания атмосферы. Первая причина связана с зависимостью между температурой и длиной волны. Наиболее эффективное измерение для конкретной температуры должно проводиться для длины волны, на которой испускается большая интенсивность. Измерение на другой длине волны потребует гораздо более чувствительной камеры для достижения

одинаковой производительности. Таким образом, для большинства приложений требуются длины волн, превышающие КИ. Вторая причина связана с пропусканием атмосферы. Инфракрасное излучение проходит через воздух, поглощается различными воздушными частицами, главным образом CO_2 и H_2O . Степень, в которой воздух поглощает инфракрасное излучение, зависит от длины волны. В полосах СИ и ДИ это поглощение низкое, что позволяет большему количеству излучения достичь датчика камеры.

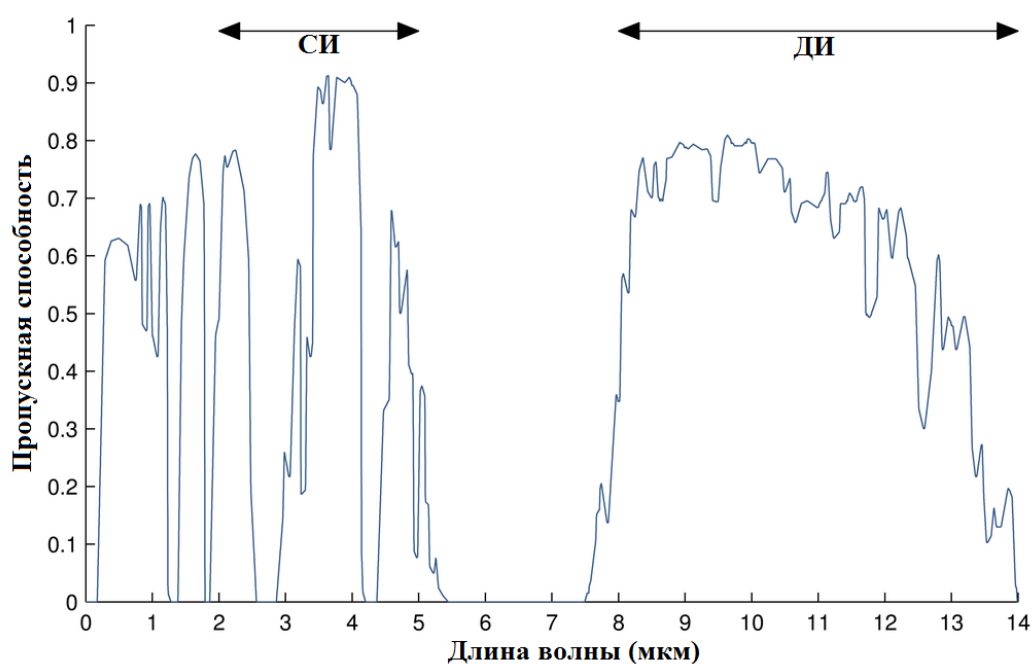


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента пропускания атмосферы при НУ от длины волны

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента пропускания атмосферы для разных длин волн. Как видно, в видимой части спектра от 0,4 до 0,7 мкм пропускается только 60% излучаемого излучения. Однако от 5 до 7,5 мкм практически отсутствует излучение. Атмосфера поглощает все это излучение. Поэтому инфракрасные измерительные устройства используют либо СИ, либо ДИ. Устройства СИ используются для высокотемпературных показаний, в то время как ДИ используется для температуры окружающей среды.

Измерение температуры с использованием средств ИТ позволяет измерить инфракрасное излучение, излучаемое объектом, и преобразовать полученную энергию в значение температуры. Однако, поскольку не все излучение исходит от измеряемого объекта, то для того чтобы точно определить температуру этого объекта, излучения от других источников (например, окружающих предметов или атмосферы) должны быть отсеяны в процессе преобразования температуры. Данный процесс называется компенсацией. Общее излучение, получаемое камерой (W_{tot}), исходит от трех источников: излучения целевого объекта (E_{obj}), излучением окружения и отражения объекта (E_{refl}) и испусканием атмосферы (E_{atm}). Его можно выразить уравнением (11). Данный процесс изображен на рисунке 4.

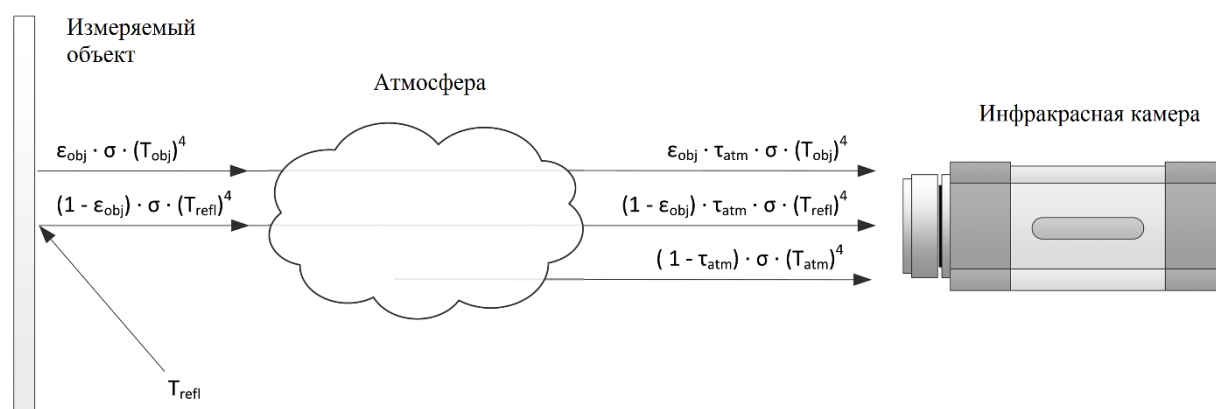


Рисунок 4 – Излучение, принимаемое инфракрасной камерой

$$W_{tot} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} \quad (11)$$

Первым источником является излучение целевого объекта. Однако не все излучение целевого объекта принимается камерой, часть его поглощается атмосферой. Таким образом, излучение целевого объекта может быть выражено уравнением (12).

$$E_{tot} = \epsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4 \quad (12)$$

Серые тела имеют коэффициент отражения больше нуля. Таким образом, они отражают инфракрасное излучение, излучаемое окружающей средой.

Коэффициент отражения можно рассчитать по излучательной способности, как показано в уравнении (10). Часть отраженного излучения также поглощается атмосферой. Это второй компонент, улавливаемый камерой и может быть выражен уравнением (13).

$$E_{refl} = \rho_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 = (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 \quad (13)$$

Третий компонент – излучение атмосферы. Его можно выразить уравнением (14), где $(1 - \tau_{atm})$ – излучение атмосферы.

$$E_{atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 = (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 \quad (14)$$

Подставляя в (11) уравнения (12) - (14), получаем уравнение (15). Поэтому температуру объекта можно вычислить из уравнения (16). Подобные уравнения используются различными изготовителями камер для измерения температуры.

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4 + (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 \quad (15)$$

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 - (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4}{\varepsilon_{obj} \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma}} \quad (16)$$

Для решения уравнения (16) должны быть поставлены следующие параметры: излучательная способность объекта (ε_{obj}), отраженная температура (T_{refl}), коэффициент пропускания атмосферы (τ_{atm}) и температура атмосферы (T_{atm}).

Коэффициент пропускания атмосферы обычно оценивается с учетом расстояния от объекта до камеры и относительной влажности. В общем случае это значение близко к единице. Температуру атмосферы получают с использованием общего термометра. Однако, поскольку излучательная способность атмосферы очень близка к нулю ($1 - \tau_{atm}$), этот параметр мало влияет на измерение температуры.

С другой стороны, излучательная способность объекта и отраженная температура оказывают очень большое влияние на измерение температуры и должны измеряться очень точно.

Использованные источники:

1. Rubèn Usamentiaga, Pablo Venegas, Jon Guerediaga - Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. 2014, 14(7), 12305-12348; doi:10.3390/s140712305
2. Thermographic camera [электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermographic_camera (дата обращения: 10.11.2017)
3. Thermography [электронный ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermography> (дата обращения: 10.11.2017)
4. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М.: Спектр, 2009. – 544 с.