

Сибирский государственный медицинский университет
Кафедра физики

С. Г. Гриняев

Тепловое излучение тел.
Термография.

Учебное пособие для студентов

Томск-2002

Сибирский государственный медицинский университет
Кафедра физики

Пректор по учебной работе
Профессор Венгеровский А. И.

«Утверждаю»: _____

«_____» _____ 2002г.

С. Г. Гриняев

Тепловое излучение тел.
Термография.

Учебное пособие для студентов

Томск-2002

УДК: 615.849

ББК: Р365

Гриняев С.Н. Тепловое излучение тел. Термография: Пособие для самостоятельной подготовки. – Томск, 2002.- 25с.

Гриняев С.Н.

В данном пособии рассматриваются особенности теплового излучения тел, даны характеристики и законы теплового излучения, описаны различные применения инфракрасного излучения в медицине. Пособие предназначено для студентов врачебных и медико-биологического факультетов и является дополнением к соответствующему разделу лекционного курса по физике для этих факультетов.

Рецензент:

зав. кафедрой теор. физики физ. фак-та ТГУ, проф. А. В. Шаповалов

© Сибирский государственный медицинский университет, 2002

Оглавление

I. Введение	3
II. Тепловое излучение тел	3
1. Спектры и свойства излучения нагретых тел	3
2. Характеристики теплового излучения	5
3. Закон Кирхгофа	7
4. Квантовая теория излучения	9
5. Законы излучения абсолютно черного тела	12
III. Применение инфракрасного излучения в медицине	14
1. Теплоотдача организма	14
2. Инфракрасное излучение тела человека	15
3. Термография	17
Список литературы	24

I. Введение

Инфракрасная область спектра включает в себе огромный объем информации о состоянии веществ на молекулярном уровне. Эта информация имеет важное значение для характеристики биологических процессов и состояния самих биологических объектов. Для решения задач практической медицины установление взаимосвязи состояния объекта с его излучением необходимо прежде всего для выявления патологических отклонений в живых организмах и лечебного применения излучения. В основе этой взаимосвязи и свойств биологических объектов лежат физические закономерности. В данном пособии рассматриваются основные законы теплового излучения и их использование в медицинских приборах.

II. Тепловое излучение тел

1. Спектры и свойства излучения нагретых тел

Тепловое излучение является одним из частных видов электромагнитных волн, которые излучаются нагретыми телами за счет энергии теплового движения атомов и молекул. Оно происходит вследствие возбуждения атомов и молекул тела при их соударениях в процессе движения и присуще всем телам. При соударениях часть кинетической энергии атомов и молекул поглощается электронами, которые переходят в возбужденные состояния с большими энергиями. Возбужденные состояния являются нестабильными, и через малую долю секунды электроны возвращаются в основное состояние, испуская поглощенную энергию в виде электромагнитного излучения. В результате часть кинетической энергии движущихся атомов и молекул превращается в энергию излучения. В макроскопическом теле число атомов и молекул очень большое, они образуют практически бесконечное число систем, обладающих самыми разными собственными частотами, поэтому тепловое излучение характеризуется почти непрерывным спектром. Степень возбуждения атомов и молекул увеличивается с ростом температуры. Это приводит к зависимости интенсивности и спектрального состава теплового излучения от температуры.

При высоких температурах ($T > 1000 \text{ K}^0$) нагретые тела в основном излучают короткие (видимые и ультрафиолетовые) волны, при низких температурах – длинные (инфракрасные - ИК). На шкале электромагнитных волн ИК излучение занимает промежуточную область между красным концом видимого спектра и коротковолновым радиоизлучением. В зависимости от длины волны λ различают ближнее ИК излучение $\lambda = 0,76 \div 1,5 \text{ мкм}$ ($1\text{мкм}=10^{-6}\text{м}$), коротковолновое ИК излучение $\lambda = 1,5 \div 5,5 \text{ мкм}$, длинноволновое ИК излучение $\lambda = 5,6 \div 25 \text{ мкм}$, дальнее ИК излучение $\lambda = 25 \div 1000 \text{ мкм}$. Этим длинам волн соответствуют частоты электромагнитных колебаний в интервале от $3,9 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{11}$ Гц. Поскольку цветовые ощущения (от красного до фиолетового) вызывают оптические лучи с длинами волн от 0,4 до 0,8 мкм, а порог чувствительности глаза соответствует температуре около 500°C , ощущаемой в виде слабого темно-красного свечения, то ИК излучение невидимо для человеческого глаза. Опыт показывает, что тепловое излучение является единственным видом излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами. В равновесном состоянии тело за единицу времени поглощает столько же энергии, сколько излучает, поэтому температура равновесного теплового излучения равна температуре находящихся с ним в равновесии тел. Главным источником теплового излучения является Солнце, в спектре которого около половины энергии излучения приходится на ИК излучение. В обычных условиях все жидкие и твердые тела имеют максимальное излучение в ИК области спектра.

Как и все электромагнитные волны, инфракрасные лучи наряду с волновыми свойствами обладают и квантовыми свойствами, т.е. они поглощаются и излучаются в виде отдельных порций (фотонов). Энергия кванта света (фотона) равна $\varepsilon = h\nu$, где h - постоянная Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$), ν – частота света. Длина волны света λ обратно пропорциональна ее частоте: $\lambda = c/\nu$, где c – скорость света ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$). Поскольку длины волн инфракрасных лучей больше, чем у видимых лучей, то кванты ИК излучения имеют меньшую

энергию и оказывают меньшее химическое воздействие, чем кванты видимого света.

При прохождении инфракрасных лучей через среды имеются особенности, связанные с длинами их волн. Одной из таких особенностей является высокая поглощаемость ИК излучения различными телами. Она обусловлена совпадением энергий фотонов ИК лучей с энергиями квантовых переходов между колебательными или электронными уровнями в веществах. По этой причине обычное стекло прозрачно лишь для волн с длинами $2,5 \div 27$ мкм, лучи с большей длиной волны через стекло не проходят. Вода прозрачна для длин волн более 1,5 мкм. Некоторые материалы (германий, эбонит), непрозрачные для видимых лучей, хорошо пропускают ИК излучение. Кожа человека является прозрачной для ИК лучей с длиной волны от 0,7 до 1,5 мкм, относительно непрозрачна для лучей с длинами волн 1,5—5 мкм и полностью непрозрачна для лучей с длиной волны более 5 мкм.

2. Характеристики теплового излучения

Интенсивность теплового излучения характеризуется *потоком излучения* Φ , который равен количеству энергии, излучаемому телом в единицу времени. Размерность потока совпадает с размерностью мощности и измеряется в ваттах (Вт). Поток излучения, испускаемый с единицы поверхности тела по всем направлениям в пределах телесного угла 2π , называется *энергетической светимостью* R , которая измеряется в единицах $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Тепловое излучение состоит из волн с различными длинами. В узком интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ энергетическая светимость пропорциональна ширине этого интервала:

$$dR = r_\lambda * d\lambda \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности r_λ называется *спектральной плотностью энергетической светимости*. Она равна мощности излучения с единицы поверхности тела в единичном интервале длин волн :

$$r_\lambda = dR/d\lambda \quad (1a)$$

Спектральная плотность энергетической светимости измеряется в единицах Дж/м². Зависимость r_λ от длины волны называется **спектром излучения** тела.

Если спектр излучения известен, то согласно (1) можно найти энергетическую светимость тела:

$$R = \int_0^{\infty} r_\lambda * d\lambda \quad (2)$$

Способность тела поглощать излучение характеризуется **коэффициентом поглощения** α , который равен отношению потока излучения, поглощенного телом, к потоку излучения, упавшего на него:

$$\alpha = \Phi_{\text{погл}} / \Phi_{\text{пад}} \quad (3)$$

Коэффициент поглощения - величина безразмерная. Для потоков монохроматического излучения с заданной длиной волны $\Phi(\lambda)$ можно определить монохроматический коэффициент поглощения:

$$\alpha_\lambda = \Phi_{\text{погл}}(\lambda) / \Phi_{\text{пад}}(\lambda) \quad (4)$$

Коэффициенты поглощения α и α_λ в зависимости от природы тела могут принимать значения от 0 до 1. Тело, которое при любой температуре полностью поглощает падающее на него излучение с любой длиной волны, называется **абсолютно черным телом**. Коэффициент поглощения абсолютно черного тела при любых длинах волн и температурах равен единице: $\alpha_\lambda^{\text{Ачт}} = 1$. Таким образом, абсолютно черное тело поглощает все падающее на него излучение. Излучение абсолютно черного тела зависит только от его температуры. Абсолютно черных тел в природе нет. Некоторые тела (сажа, черный бархат и т.д.) в определенном интервале длин волн приближаются по своим свойствам к абсолютно черному телу. Идеальной моделью черного тела является замкнутая, непрозрачная полость с небольшим отверстием. Температура полости поддерживается постоянной. Излучение, попавшие в отверстие, претерпевают многократные отражения. При каждом отражении часть энергии излучения поглощается стенками. При малом, по сравнению с полной площадью полости, размере отверстия внешнее излучение любой частоты будет практически

полностью поглощено. Поэтому излучение внутри полости, а также излучение, выходящее из отверстия наружу, можно рассматривать как излучение абсолютно черного тела.

Тело, коэффициент поглощения которого меньше единицы, но одинаков для всех длин волн и зависит только от температуры, называют *серым*. Серых тел в природе тоже нет, но в ограниченном интервале волн некоторые тела поглощают как серые. В частности, коэффициент поглощения тела человека в ИК области спектра слабо зависит от длины волны и приблизительно равен 0,9, поэтому тело человека можно считать серым.

Введенные характеристики часто используют и как функции частоты ν :

$$\begin{aligned} dR &= r_\nu * d\nu \\ r_\nu &= dR/d\nu \\ R &= \int_0^\infty r_\nu * d\nu \end{aligned} \quad (5)$$

$$\alpha_\nu = \Phi_{\text{погл}}(\nu) / \Phi_{\text{пад}}(\nu)$$

Переход от одной переменной (частоты волны ν) к другой переменной (длине волны λ) осуществляется с помощью соотношений $c = \lambda * \nu$, $d\lambda/d\nu = -c/\nu^2$. Опуская несущественный знак минус, получаем связь спектральной плотности энергетической светимости как функции от длины волны и частоты:

$$r_\nu = dR/d\nu = (dR/d\lambda) * (d\lambda/d\nu) = r_\lambda * c/\nu^2 = r_\lambda * \lambda^2/c \quad (6)$$

3. Закон Кирхгофа

Тепловое излучение является равновесным процессом, поэтому оно должно подчиняться законам термодинамики. Из условий равновесия, основанных на втором законе термодинамики, вытекает определенная связь между величинами α_λ и r_λ (или α_ν и r_ν). Для ее нахождения рассмотрим замкнутую полость, внутри которой находятся различные тела. Пусть температура полости поддерживается постоянной, а тела обмениваются энергией между собой и с полостью только путем испускания и поглощения электромагнитного излучения. Через некоторое время данная система придет в

состояние термодинамического равновесия и все тела примут температуру оболочки. Это означает, что каждое тело независимо от своей формы и состава излучает и поглощает одинаковую энергию. Для сохранения термодинамического равновесия тела, испускающие больше энергии при какой-либо длине волны должны и больше поглощать волн с такой же длиной волны. При этом спектральное распределение равновесного электромагнитного излучения внутри полости не должно зависеть от количества и вида присутствующих в полости тел. Отсюда следует, что отношение спектральной плотности энергетической светимости к монохроматическому коэффициенту поглощения одинаково для любых тел и является универсальной функцией длины волны (или частоты) и температуры (**закон Кирхгофа**) :

$$r_{\lambda}/\alpha_{\lambda} = f(\lambda, T) \quad (7)$$

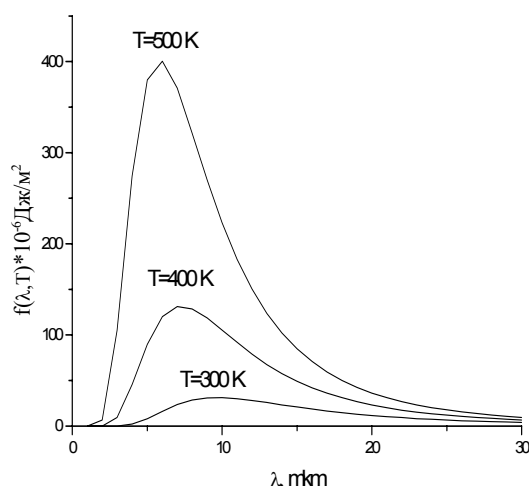
Закон Кирхгофа справедлив для всех тел, в том числе и для абсолютно черного тела, для которого $\alpha_{\lambda}^{A_{cm}} = 1$. Поэтому функция Кирхгофа $f(\lambda, T)$ есть не что иное, как спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$f(\lambda, T) = r_{\lambda}^{A_{cm}} \quad (8)$$

Из формул (7) и (8) получаем :

$$r_{\lambda} = \alpha_{\lambda} * r_{\lambda}^{A_{cm}} \quad (9)$$

Поскольку $\alpha_{\lambda} < 1$, то спектральная плотность энергетической светимости



любого тела меньше спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела при той же температуре, то есть черное тело при прочих равных условиях является наиболее интенсивным источником теплового излучения. Из формулы (9) следует также, что если тело не поглощает при какой-то длине волны ($\alpha_\lambda=0$), то оно при этой же длине волны и не излучает ($r_\lambda=0$). Закон Кирхгофа позволяет из зависимости монохроматического коэффициента поглощения определить и спектр излучения (и наоборот). Этот закон справедлив только для теплового излучения, поэтому излучение, которое ему не подчиняется, не является тепловым. Функцию Кирхгофа $f(\lambda, T)$ можно определить экспериментально, измеряя интенсивность излучения из малого отверстия нагретой замкнутой полости для различных участков спектра. Результаты таких измерений при разных температурах показаны на рисунке. Видно, что распределение энергии в спектре черного тела не является равномерным. Основной особенностью функции Кирхгофа $f(\lambda, T)$ является наличие максимума, который смещается в сторону коротких волн с повышением температуры. Площадь под кривой $f(\lambda, T)$, согласно формуле (2), дает энергетическую светимость абсолютно черного тела $R^{A_{cm}}$, которая зависит только от температуры. Видно, что $R^{A_{cm}}$ растет с увеличением температуры.

Функцию Кирхгофа долгое время пытались определить на основе законов классической теории, предполагая, что элементарные излучатели, из которых состоит черное тело, могут иметь любую энергию и излучают непрерывно. Однако получаемое при этом выражение приводит к результатам, которые не согласуются с опытными данными. Решение возникшей проблемы привело к необходимости пересмотра классических представлений.

4. Квантовая теория излучения

Анализируя накопленные к концу 19-го века результаты по излучению абсолютно черного тела, немецкий физик Макс Планк в 1900 году пришел к выводу, что для получения экспериментальной кривой $f(\lambda, T)$ необходимо сделать предложение о том, что электромагнитное излучение испускается и

поглощается не непрерывно, а дискретными порциями (квантами или фотонами). Минимальная энергия одного кванта равна $\varepsilon = h\nu$, а энергии порций излучения ε_n кратны этой величине: $\varepsilon_n = nh\nu$, ($n=0,1,2,\dots$). Фотоны излучаются микроскопическими объектами – атомами и молекулами при их переходах из одних состояний в другие. Энергии разрешенных состояний могут принимать только дискретные значения. Поскольку излучение абсолютно черного тела не должно зависеть от материала стенок, то для определения функции $f(\lambda, T)$ можно использовать простейшую модель стенок, в которой составляющие их атомы и молекулы представляются гармоническими осцилляторами с энергиями ε_n . В равновесном состоянии относительные вероятности осцилляторов зависят от их энергий согласно распределению Больцмана:

$$P_n = \frac{\exp(-\varepsilon_n / kT)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp(-\varepsilon_n / kT)} \quad (10)$$

Здесь k – постоянная Больцмана ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К). Среднее значение энергии одного колебания равно:

$$\langle \varepsilon \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \varepsilon_n \quad (11)$$

Суммируя геометрическую прогрессию, получаем :

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{h\nu}{\exp(h\nu / kT) - 1} \quad (12)$$

В пределе $h \rightarrow 0$, когда энергия может принимать непрерывный ряд значений, данное выражение переходит в среднюю энергию классического осциллятора $\langle \varepsilon \rangle_{\text{кл}} = kT$, которая не зависит от частоты. Используя формулу (12), определим функцию Кирхгофа $f(\nu, T)$. Осцилляторы могут испускать электромагнитные волны с двумя взаимно перпендикулярными направлениями поляризации. Можно показать, что общее число осцилляторов, приходящихся на единичный интервал частот и единицу объема излучающей, замкнутой полости равно $8\pi\nu^2/c^3$. Поэтому плотность энергии излучения равна $\langle \varepsilon \rangle 8\pi\nu^2/c^3$.

Умножая эту величину на скорость света, получим поток излучения в одном направлении $\langle \varepsilon \rangle 8\pi\nu^2/c^2$. Излучение во всех направлениях одинаково. Число всех лучей, испускаемых единичной площадкой в единицу времени в единичном интервале частот с равномерно распределенными в пределах телесного угла 2π направлениями, равно $N_n = 2\pi\nu^2/c^2$. Поэтому суммарный поток энергии излучения равен $\langle \varepsilon \rangle N_n$. По своему смыслу этот поток совпадает со спектральной плотностью энергетической светимости абсолютно черного тела. Таким образом, для функции Кирхгофа $f(\nu, T)$ получаем выражение (формулу Планка):

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2 (\exp(h\nu/kT) - 1)} \quad (13)$$

Применяя формулу перехода (6), находим функцию Кирхгофа как функцию от длины волны:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp(hc/\lambda kT) - 1)} \quad (13a)$$

Формула Планка согласуется с экспериментальными данными по излучению абсолютно черного тела во всем интервале частот и температур.

В области высоких температур тепловая энергия много больше энергии кванта $kT \gg h\nu$, что позволяет пренебречь дискретным характером излучения и считать его непрерывным. В этом пределе длинных волн формула Планка переходит в формулу, полученную Релеем и Джинсом на основе классической, волновой теории излучения:

$$f_{кл}(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2 kT}{c^2} = N_n \langle \varepsilon \rangle_{кл} \quad (14)$$

С ростом частоты энергия излучения согласно (14) неограниченно растет, что противоречит экспериментальным результатам. Такое расхождение результатов теории с экспериментом получило название “ультрафиолетовой катастрофы”.

В пределе низких температур, когда энергия фотона много больше тепловой энергии $h\nu \gg kT$ и $e^{h\nu/kT} \gg 1$, из (13) получаем формулу Вина:

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT} = N_{\nu} h\nu e^{-h\nu/kT} \quad (15)$$

Из нее видно, что в случае коротких волн излучение можно рассматривать согласно корпускулярной теории света Ньютона как газ, состоящий из N_{ν} частиц (с энергиями $h\nu$), распределенных по закону Больцмана. При высоких температурах формула Вина, однако, не справедлива. Таким образом, как волновая, так и корпускулярная теории теплового излучения являются лишь приближенными. Между областями их применимости находится обширная переходная область, в которой и лежит максимум функции Кирхгофа. В действительности излучению (как и всем материальным телам) присущи одновременно и волновые и корпускулярные свойства (корпускулярно-волновой дуализм). Эта квантовая природа света и нашла свое отражение в формуле Планка.

Гипотеза о квантах получила всеобщее признание лишь после того, как Эйнштейном было показано, что помимо теплового излучения существуют и другие явления (в частности, фотоэффект), которые можно объяснить на ее основе и которые необъяснимы с классической точки зрения. Согласно Эйнштейну, энергия не только излучается и поглощается квантами, но и между этими процессами проявляется в виде частицы - фотона, так что все электромагнитное излучение имеет квантовый характер.

5. Законы излучения абсолютно черного тела

Из формулы Планка следуют законы, которые были установлены либо экспериментально, либо из законов термодинамики и электродинамики еще до работы Планка. Определим максимум функции Кирхгофа $f(\lambda, T)$ от длины волны.

Из условия экстремума функции $\frac{\partial f(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0$, получаем уравнение: $e^x = \frac{5}{5-x}$, в

котором $x = \frac{hc}{\lambda kT}$. Решением этого уравнения является $x_{max} \cong 4.965$. Отсюда находим соотношение между температурой и длиной волны, соответствующей максимуму спектральной плотности (закон смещения Вина):

$$\lambda_{max} = b/T \quad (16)$$

Здесь $b = \frac{hc}{4.965k} \cong 2.8978 * 10^{-3} \text{ мК}$ - постоянная Вина. Из формулы (16)

следует, что максимум энергии излучения черного тела с повышением температуры сдвигается в сторону коротких волн. Закон Вина выполняется и для серых тел. Этим законом объясняется, например, тот факт, что с повышением температуры тела его цвет меняется от темно-красного до голубого. При комнатной температуре тепловое излучение тел в основном приходится на инфракрасную область спектра и человеческим глазом не воспринимается. Закон Вина можно использовать для практического определения температуры тела. В частности, из максимума спектра излучения Солнца следует, что температура его поверхности составляет около 6100° К . Если в законе Вина вместо λ_{max} подставить пределы ИК излучения, получим температуры от 1,5 до 3800° К . Поэтому все тела в обычных условиях имеют максимальное излучение в ИК области спектра.

Аналогичным образом можно определить максимум функции Кирхгофа $f(\nu, T)$ от частоты. Из условия экстремума $\frac{\partial f(\nu, T)}{\partial \nu} = 0$ получается уравнение:

$e^y = \frac{3}{3-y}$, в котором $y = \frac{\nu}{kT}$. Решением данного уравнения является значение $y_{max} \cong 2.821$. В результате находим соотношение: $\nu_{max} = aT$ ($a = \kappa * y_{max}$), из которого

следует, что величины λ_{max} и ν_{max} не связаны соотношением $\lambda = c/\nu$, и поэтому максимумы функций $f(\lambda, T)$ и $f(\nu, T)$ расположены в разных частях спектра.

Рассчитаем энергетическую светимость абсолютно черного тела $R^{A_{чм}}$ по формуле (5), заменяя $r_\nu^{A_{чм}}$ на функцию Кирхгофа (13):

$$R^{A_{чм}} = \int_0^\infty f(\nu, T) d\nu = \int_0^\infty \frac{2\pi h \nu^3}{c^2 (\exp(h\nu / kT) - 1)} d\nu = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \sigma T^4 \quad (17)$$

Величина интеграла равна $\pi^4/15$, поэтому $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \approx 5.67 * 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}$

(постоянная Стефана-Больцмана). Таким образом, энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Поэтому чем сильнее нагрет источник, тем интенсивнее он излучает. Этот закон был установлен из анализа экспериментальных данных (Стефан) и на основе термодинамического метода (Больцман). Используя экспериментальные значения постоянных Вина и Стефана-Больцмана, Планк впервые определил величину постоянной h . В настоящее время наиболее точное значение постоянной h (до шести знаков) дают измерения кванта сопротивления из исследований квантового эффекта Холла в полупроводниковых гетероструктурах.

II. Применение инфракрасного излучения в медицине

1. Теплоотдача организма

Организм человека можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, поглощающую энергию из окружающей среды и выделяющую тепло. Живой организм непрерывно расходует на поддержание жизненно важных функций энергию, которая выделяется при окислении содержащихся в пище углеводов, жиров и белков. Химическая реакция, снабжающая тело энергией, это превращение углерода глюкозы ($C_6H_{12}O_6$) в оксид углерода CO_2 и воду H_2O . Каждый окисляемый грамм глюкозы дает 3,8 ккал энергии. У других продуктов питания на каждый потребленный грамм продуктов приходятся иные энергии. Вследствие экзотермических биохимических процессов в клетках и тканях, а также за счет высвобождения энергии, связанной с синтезом ДНК и РНК, вырабатывается большое количество теплоты - 50-100 ккал/г. Это тепло распределяется внутри организма с помощью циркулирующих крови и лимфы, выравнивающих температурные градиенты между центральными и периферическими областями организма.

Благодаря терморегуляции, осуществляемой различными отделами нервной системы (главным образом вегетативными), достигается динамическое равновесие двух процессов - теплопродукции и теплоотдачи и обеспечивается постоянство температуры тела независимо от температуры окружающей среды.

В различных частях тела температура неодинакова и определяется расположением органа, степенью кровоснабжения, функциональной активностью, температурой внешней среды. Основное количество тепла вырабатывается во внутренних органах, но при физической работе положение изменяется в связи с усилением метаболических процессов в мышцах: температура сокращающихся мышц повышается на 7°C .

Температура поверхности тела человека является параметром, отражающим состояние регуляторных систем. Для каждого человека характерно определенное распределение температур на поверхности тела. Местная температура в любой точке поверхности определяется рядом факторов, главный из которых – перенос тепла кровью, т. е. кровоснабжение, и выделение тепла в результате локальной метаболической активности. Причиной температурных перепадов на поверхности кожных покровов являются нормальные и патологические процессы, происходящие в организме. В условиях патологии в результате воспалительных и опухолевых процессов, механических повреждений возникают нарушения кровообращения и метаболических процессов, которые приводят к образованию зон усиленной радиации тепла на поверхность кожи. Из анализа распределения тепла на поверхности тела человека можно определить патологические изменения, происходящие во внутренних органах, и оценить их динамику в ходе лечения. По участкам тела с аномально высокой или низкой температурой можно распознать симптомы более 150 болезней на самых ранних стадиях их возникновения.

2. Инфракрасное излучение тела человека

Человек как биологическое тело, имеющее температуру в интервале от 31 до 42°C , является источником преимущественно инфракрасного излучения.

Основная часть излучения кожи человека приходится на диапазон волн 4-50 мкм, то есть длинноволновую область инфракрасного излучения. На излучение с длиной волны 5 мкм приходится 1% энергии всего излучения, с длинами волн 5-9 мкм - 20% , с длинами волн 9-16 мкм – 38%, на остальное, более длинноволновое излучение - около 41%. Максимум излучения приходится на длину волны 9,5 мкм. Исследования показывают, что в длинноволновой инфракрасной области кожа человека излучает как абсолютно черное тело. Например, положение максимума излучения соответствует температуре поверхности кожи 32°C (305°K) в согласии с законом Вина (16). Вследствие сильной зависимости энергетической светимости от температуры (четвертая степень термодинамической температуры согласно закону Стефана-Больцмана) даже небольшое изменение температуры тела вызывает значительное изменение излучаемой мощности. Последовательно логарифмируя и дифференцируя уравнение (17), получаем $dR^{A_{um}}/R^{A_{um}}=4dT/T$, то есть относительное изменение энергетической светимости больше относительного изменения температуры излучающей поверхности в 4 раза. Поэтому, например, если температура поверхности тела человека изменится на 3°C, т.е. на 1%, то его энергетическая светимость изменится на 4%. Такое изменение в излучаемой мощности можно зарегистрировать с помощью современных приемников инфракрасного излучения. Из обработки сигналов приемников можно рассчитать излучение с поверхности кожи, если известна ее температура, или, наоборот, по величине регистрируемого излучения определять температуру отдельных ее участков.

Температура поверхности тела человека представляет собой суммарную температуру всех расположенных в области измерения органов и тканей. Самую низкую температуру (23-30°) имеют дистальные отделы конечностей, кончик носа, ушные раковины. Самая высокая температура подмышечной области, в промежности, области шеи, губ, щек. Остальные участки тела имеют температуру 31-33,5°C. Суточные колебания температуры кожи в среднем составляют 0,3-0,1°C и зависят от физической и психической нагрузок, а также других факторов. При прочих равных условиях минимальные изменения

температуры кожи наблюдаются в области шеи и лба, максимальные — в дистальных отделах конечностей, что объясняется влиянием высших отделов нервной системы. У женщин часто кожная температура ниже, чем у мужчин. С возрастом эта температура снижается и уменьшается ее изменчивость под воздействием температуры окружающей среды. При всяком изменении температуры внутренних областей тела включаются терморегуляторные процессы, которые устанавливают новый уровень равновесия температуры тела с окружающей средой.

У здорового человека распределение температур симметрично относительно средней линии тела. Нарушение этой симметрии и служит основным критерием диагностики заболеваний. Количественным выражением термоасимметрии выступает величина перепада температуры.

3. Термография

Термографией (греч. therme – теплота, жар; grapho - писать, изображать; синоним: тепловидение, инфраскопия) называется получение видимого изображения объекта на основании его собственного инфракрасного излучения. Началом медицинской термографии послужило открытие, сделанное в 1956 году канадским ученым Р.Лауссоном. Он обследовал молочные железы больных раком этого органа и получил тепловую картину, которая отличалась от тепловой картины здоровых лиц. Основным признаком поражения молочных желез была асимметрия теплового поля.

Физиологической основой термографии является увеличение интенсивности инфракрасного излучения над патологическими очагами в связи с усилением в них кровоснабжения и метаболических процессов или уменьшение его интенсивности в областях с уменьшенным кровотоком и сопутствующими изменениями в тканях и органах.

Поскольку инфракрасные лучи невидимы для глаз человека, то для их обнаружения нужны специальные приборы (*термографы, тепловизоры*), которые улавливают излучение, усиливают его и превращают в видимую для

глаз картину. Прибор, позволяющий получить изображение (*теповизиограмма*) на экране электронно-лучевой трубки, обычно называют тепловизором; прибор, который позволяет получить изображение изучаемого объекта на бумаге, обычно называют термографом, а само изображение *термограммой*.

Все приемники излучения можно объединить в две группы: тепловые и фотоэлектрические. Представители первой группы характеризуются тем, что в них энергия фотонов падающего излучения поглощается всем объемом чувствительного элемента, вызывая тем самым изменение его температуры. По степени ее изменения можно судить о величине падающего на приемную площадку излучения. Примером теплового приемника является термоэлемент, нагревание которого вызывает электрический ток. Термоэлемент представляет из себя замкнутую цепь из двух разных металлов или полупроводников, имеющих разные плотности свободных электронов (n_1 и n_2). За счет различия в диффундирующих потоках электронов металлы (или полупроводники) заряжаются противоположными зарядами, и возникает внутренняя контактная разность потенциалов, которая зависит от температуры: $U = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$. Если

температуры двух контактов А и В разные, то в цепи возникает термоэлектродвижущая сила:

$$\mathcal{E} = U_A - U_B = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_A - T_B), \quad (18)$$

которая и приводит к появлению электрического тока. Если известна зависимость \mathcal{E} от разности температур ($T_A - T_B$) и температура одного из контактов, то можно определить температуру другого контакта. Контакты металлов или полупроводников могут быть сделаны достаточно малыми, что позволяет измерять температуру небольших объектов. Тепловые приемники являются неселективными индикаторами, т. е. они одинаково реагируют на излучения любой длины волны.

К фотоэлектрическим приемникам относят фотоэлементы, электронно-оптические преобразователи и фотосопротивления. У фотоэлектрических приемников общим признаком является взаимодействие фотонов падающего потока излучения с электронами, находящимися в объеме фоточувствительного слоя. Такое взаимодействие приводит к изменению энергетического состояния этих электронов, что проявляется в возникновении повышенной электропроводности, пропорциональной количеству падающей на приемник инфракрасной энергии. Фотоэлементы и электронно-оптические преобразователи основаны на внешнем фотоэффекте, то есть испускании веществом электронов под действием внешнего электромагнитного излучения. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах. В твердых телах внешний фотоэффект можно представить в виде трех последовательных процессов, происходящих в источнике электронов, который называется фотокатодом: поглощение фотона электроном проводимости, движение электрона к поверхности тела, выход электрона из тела. Все закономерности фотоэффекта описываются уравнением Эйнштейна:

$$h\nu = A + mv^2/2 \quad (19)$$

где $\varepsilon = h\nu$ - энергия поглощенного фотона, $mv^2/2$ – кинетическая энергия вылетевшего из тела электрона, A – работа выхода электрона из фотокатода. При фиксированной частоте падающего света, сила фототока I определяется количеством вылетевших электронов, которое прямо пропорционально интенсивности света (первый закон Столетова для внешнего фотоэффекта). Фототок растет с увеличением прямого напряжения U между электродами. Максимальное значение фототока I_{max} при заданной интенсивности и частоте света определяется таким значением напряжения U , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. На вольт-амперной характеристике $I(U)$, начиная с этого напряжения, фототок больше не меняется – этот участок называют режимом насыщения. В режиме насыщения фототок зависит только от характеристик (интенсивности и частоты) падающего света. При этом

максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света, а зависит только от его частоты (второй закон Столетова). Фотоны, энергий которых недостаточно, для того чтобы вырвать электрон из фотокатода, никакого вклада в фототок не дают. Поэтому существует минимальная частота света ν_{min} (красная граница фотоэффекта), ниже которой фотоэффект невозможен (третий закон Столетова). Согласно (19), красная граница фотоэффекта определяется выражением $\nu_{min}=A/h$. Величина ν_{min} зависит от материала, из которого сделан фотокатод и состояния его поверхности. Большей чувствительностью к электромагнитному излучению обладают фотокатоды, сделанные из материалов с меньшей работой выхода. Малой работой выхода обладают, например, сурьмяно-щелочные соединения (K_3Sb , Na_2KSb , Cs_3Sb и т.д.), которые часто используются в качестве фотокатодов. В обычной атмосфере такие вещества быстро разлагаются, поэтому их помещают в стеклянные баллоны, из которых откачан воздух. В фотоэлементе оптический сигнал преобразуется в электрический, который затем усиливается в фотоумножителях и в таком виде несет информацию о внешнем излучении. Затем он может быть воспроизведен на экране дисплея в виде изображения или с помощью записывающего устройства на специальной электрохимической бумаге. В электронно-оптических преобразователях поток вылетевших фотоэлектронов ускоряют и фокусируют дополнительным электрическим полем, направляя его затем на люминесцентный экран. При соударении электронов с частицами покрытия из люминофора за счет катодолюминесценции возникает свечение экрана, электронный сигнал вновь преобразуется в световой. Этот сигнал можно подать в виде развертки на телевизионную систему и получить (тепловое) изображение объекта. При разной температуре, т.е. различной степени интенсивности излучения объекта, наблюдается различная яркость изображения: более нагретым областям соответствуют более светлые участки, менее нагретым – более темные. В термографах, градуированных цветом, определенной температуре соответствует свой цвет.

Работа фотоэлементов, сделанных из фотосопротивлений, основана на внутреннем фотоэффекте, в котором электроны за счет энергии электромагнитного излучения переходят из валентной зоны в зону проводимости, оставаясь внутри полупроводника или диэлектрика. За счет таких переходов возникают дополнительные свободные носители заряда (дырки и электроны), которые приводят к уменьшению его сопротивления пропорционально падающему световому потоку. Полученный электрический сигнал в виде фототока снова может быть усилен и воспроизведен в виде изображения на дисплее или электрохимической бумаге. Простейшее фотосопротивление представляет собой тонкий слой полупроводника с металлическими электродами. В детекторах инфракрасного излучения используются полупроводниковые соединения PbSe, PbTe, PbS, InSb и твердые растворы CdHgTe.

В настоящее время широкое применение находят термографы отечественного производства «Рубин», «Радуга», «ТВ-03» и другие. Они позволяют обнаруживать на поверхности объекта перепады температур порядка сотых долей градуса. При этом поле обзора прибора может иметь поперечный размер от единиц до десятков угловых градусов, мгновенное поле зрения — несколько миллирадиан.

Помимо бесконтактной термографии, выполняемой с помощью термографов, существует контактная (жидкокристаллическая) термография, которую проводят с помощью жидких кристаллов, изменяющих свой цвет в зависимости от интенсивности и волнового диапазона инфракрасного излучения поверхности, на которую они нанесены. Жидкие кристаллы обладают термочувствительностью около $0,001^{\circ}\text{C}$. Контактные термограммы получают путем прикладывания к поверхности тела пленки или паст с жидкокристаллическим соединением.

Термография зарекомендовала себя как высокоэффективный метод исследования. Ее используют при диагностике заболеваний молочной железы, шеи и лица, вен нижних конечностей, особенно при выявлении «скрытого»

варикозного расширения вен у больных с выраженным слоем подкожной клетчатки, лимфостазами, отеками. В некоторых случаях она является наиболее действенным методом обнаружения ранних метастазов рака в костях, наличие которых не всегда можно подтвердить с помощью рентгенологического исследования. Она позволяет следить за развитием некротического процесса у больных с трофическими язвами ног и оценивать эффективность терапии. Термография применяется для диагностики острой хронической патологии органов брюшной полости и рака щитовидной железы, дает возможность определять метаболические процессы, происходящие в этих органах, а также оценивать эффективность хирургического лечения, выявлять рецидивы рака. Термографию используют для оценки нарушения мозгового кровообращения, она позволяет определять поражения сонных артерий. Термография применяется для диагностики различных заболеваний женской половой сферы, в акушерстве, стоматологии, неврологии и нейрохирургии, офтальмологии, дерматологии, в протезировании артерий, при пересадке почек, для контроля эффективности некоторых видов консервативного лечения и др.

Время проведения термографического исследования должно соответствовать хронобиологической или хронопатологической организации исследуемой ткани, органа. Например, при меланобластоме максимальное повышение температуры передней поверхности глаза происходит с 9.00 до 9.30 и с 17.00 до 21.00.

В связи с высокой чувствительностью инфракрасной термографии к изменению температуры она должна проводиться в специально оборудованных кабинетах, в которых поддерживается постоянная температура. Двери и окна закрываются плотными светозащитными шторами. Возможные источники инфракрасного излучения (батареи отопления) экранируются теплоизолирующими материалами. Для освещения используются холодно-катодные источники света. Относительная влажность воздуха в помещении — $60 \pm 5\%$; скорость движения воздушных потоков не выше $0,1—0,15$ м/с.

Анализ данных термографии включает качественную оценку термотопологии исследуемой области (изучение распределения «горячих и «холодных» участков), количественную оценку с определением разности температур (градиентов) исследуемого участка по сравнению с симметричной зоной тела, окружающими тканями, условно выбранной областью, а также обработку изображения с помощью ЭВМ.

Наличие патологических процессов проявляется в одном из трех качественных термографических признаков: появление аномальных зон гипотермии, нарушение нормальной термотопографии сосудистого рисунка, изменение градиента температуры в исследуемой зоне. Например, для рака характерна очаговая гипертермия в пределах $0,4—2,8^{\circ}\text{C}$, при этом зона гипертермии на термограммах имеет интенсивное свечение, округлую или неправильную форму, резкие контуры, однородную структуру.

Термография отличается от других методов исследования своей простотой, доступностью, высокой информативностью, абсолютной безвредностью, быстротой исследования. Этот метод не имеет противопоказаний, так как термограф работает на расстоянии от пациента и использует его естественное излучение. С помощью термографии воспалительный процесс и его распространенность можно определить еще до развития выраженных клинических симптомов. Она дает хорошие результаты при раннем выявлении многих заболеваний, особенно на первом этапе диагностики в поликлинической практике.

Недостатком метода следует считать отсутствие установленных надежных термографических критериев при некоторых заболеваниях. В настоящее время термография как самостоятельный диагностический метод дает еще высокий процент ложноположительных и ложноотрицательных ответов, поэтому обязательным является сопоставление ее данных с данными как клинического, так и рентгенологического и других способов обследования больного.

Список литературы

1. Борн М. Атомная физика. М.: Мир, 1970. 496 с.
2. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. М.: Высшая школа. 1999. 616 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1979. Т.3.304 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2000. 542 с.
5. Мазурин В.Я. Медицинская термография, 1984.
5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография, 1988.

**Тепловое излучение тел.
Термография.**

С.Н. Гриняев

Пособие для самостоятельной подготовки

Корректор И.А.Зеленская

Отпечатано в лаборатории оперативной типографии СГМУ

Заказ № _____ Тираж _____ экз.