

Теория теплообмена

fnpr@ntimgudt.ru

Введение

A decorative graphic element consisting of several horizontal lines of varying lengths and colors (teal, light blue, white) extending from the right side of the slide.

Литература

- **Основная литература:**

Б-1. Теплообменные аппараты и приборы в легкой промышленности: Учеб. пособие для студ. учеб. заведений / Б. П. Кондауров, Л. Т. Бахшиева, В. С. Салтыкова и др.; Под ред. проф. А. А. Захаровой. – М.: Издательский центр «Академия». 2003. – 192 с.

- **Дополнительная литература:**

Б-2. Светлов Ю. В. Метод расчетного анализа массообменных процессов в обуви // Кож.-обув. пром-сть. -2004. №1. -с.45-47

Б-3. Теплоемкостные свойства материалов легкой промышленности / Бахшиева Л. Т., Салтыкова В. С., Александров В. И. и др. // Актуальные проблемы науки, техники и экономики легкой промышленности: Тез. докл. Междунар. науч.-тех. конф. -2000. –с.156-157

- **Базы данных, Интернет-ресурсы, информационно-справочные и поисковые системы**

<http://www.znanium.com/>.

- Электронный ресурс удаленного доступа

- Б-4 Кудинов А. А. Теплоемкость: учебн. Пособие / А. А. Кудинов – М.: Инфра-М, 2012. – 375 с. <http://www.znanium.com/bookread.php?book=238920>

Разделы

- **Теория массообмена** изучает законы распространения и передачи вещества между фазами.
- **Теория теплообмена** изучает законы распространения и передачи теплоты между телами.

Теория теплообмена

Способы передачи тепла. Закономерности переноса теплоты и количественные характеристики процесса. Плотность теплового потока.

Основные понятия и определения

- Мера нагретости тела - его **температура**;
- Теплота **самопроизвольно** передается от среды с более высокой температурой к среде с более низкой температурой;
- **Тепловые** – процессы, скорость которых определяется скоростью переноса энергии в форме теплоты;
- **Движущая сила** – разность температур Δt ;
- **Количество переданной теплоты** - Q , Дж, кДж;

Основные понятия и определения

- **Тепловой поток** – Q , Дж/с
- **Плотность теплового потока** - количество теплоты, передаваемой через единицу поверхности в единицу времени:

$$q = \frac{Q}{F} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

- **Теплообменная поверхность** – F , м^2 ;
- Процесс передачи теплоты – установившийся и неуставившийся:

$$Q = f(\Delta t; F; \tau \dots)$$

Температурное поле

- **Температурное поле** – совокупность мгновенных значений температур всех точек тела в данный момент времени:

$$t = f(x; y; z; \tau)$$

где $x; y; z$ – координаты произвольной точки тела;

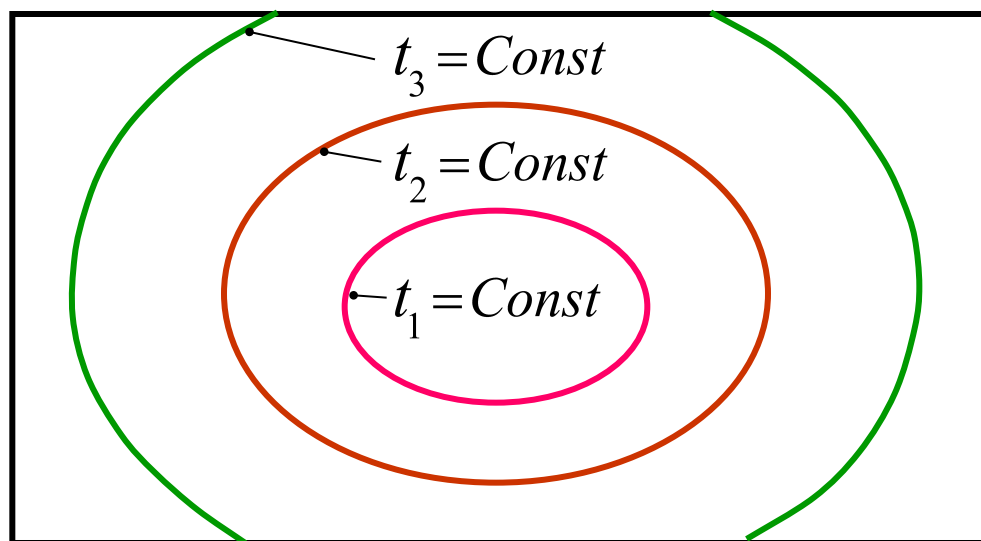
τ – текущее время.

Стационарное (установившееся) температурное поле, в котором температуры не изменяются во времени. В противном случае температурное поле называется нестационарным. Температурное поле может быть одно-, двух- и трехмерным.

Уравнения температурного поля

Температурное поле	Стационарное	Нестационарное
1-мерное	$t = f(x)$	$t = f(x, \tau)$
2-мерное	$t = f(x, y)$	$t = f(x, y, \tau)$
3-мерное	$t = f(x, y, z)$	$t = f(x, y, z, \tau)$

Изотермическая поверхность

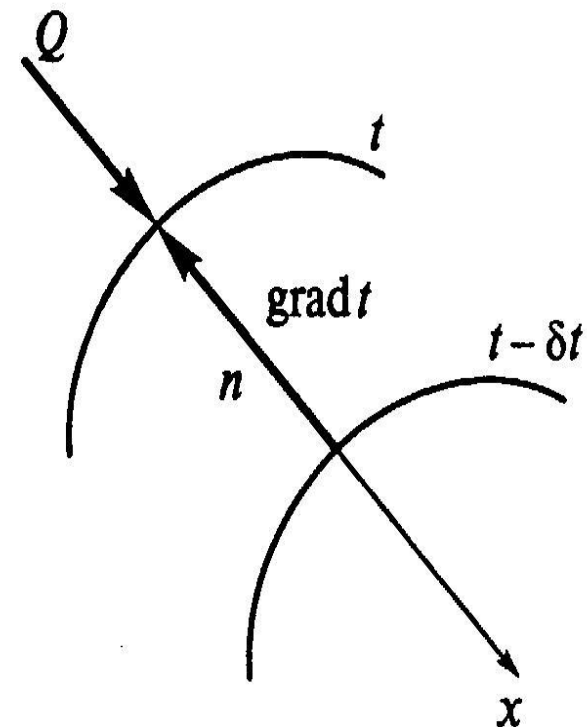


Изотермическая поверхность – это геометрическое место точек с одинаковой температурой.

Градиент температуры

- **Градиент температуры** - это **вектор**, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону **возрастания температуры**. Численно градиент температуры равен производной от температуры по нормали к поверхности:

$$\mathit{grad}t = \lim\left(\frac{\Delta t}{\Delta n}\right) = \frac{dt}{dn}$$



Теплофизические свойства рабочих тел

- **Теплоемкость c** - количество теплоты, необходимой для изменения на 1 градус единичной массы рабочего тела (вещества). В основном при изучении теплопереноса используют теплоемкость при постоянном давлении c_p . Величина c зависит от температуры. $Дж/(кгК)$, $кДж/(кгК)$.
- **Удельная теплота конденсации r** (или обратных процессов — **испарения, парообразования**) - количество теплоты, выделяющейся при конденсации (необходимой для испарения) единичной массы вещества. r в $Дж/кг$ (в таблицах приводится в $кДж/кг$). Конденсация или кипение индивидуальных веществ происходит при неизменной температуре $t_{кип} = const$.

- **Энтальпия** ("*физическое тепло*", которое "*несет с собой*" тело, поток), H, h, J, i Дж/кг, кДж/кг. Энтальпию принято отсчитывать от некой температуры t_0 , при которой принимается $H, h, i = 0$. Чаще всего за начало отсчета энтальпии принимают $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; в холодильных процессах, дабы не оперировать отрицательными энтальпиями, точку отсчета выбирают ниже (например, $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$). В практических расчетах в подавляющем большинстве случаев оперируют разностями энтальпий, поэтому точка отсчета энтальпий и их абсолютные значения роли не играют.

Способы (механизмы) передачи теплоты

- **Теплопроводность** – перенос энергии микрочастицами (молекулами, ионами, электронами) за счет их «теплого» движения. Процесс протекает на молекулярном уровне. **Само вещество не перемещается вдоль тела-переносится лишь энергия.**
- **Конвекция** – перемещение в пространстве неравномерно нагретых объемов среды, перенос тепла связан с переносом массы;
- **Тепловое излучение** – перенос тепла от одного тела к другому электромагнитными волнами.

Механизм теплопроводности

Амплитуда колебаний атомов в узлах кристаллической решетки в точке А меньше, чем в точке В.

Вследствие взаимодействия атомов друг с другом амплитуда колебаний атомов, находящихся рядом с точкой В, возрастает.



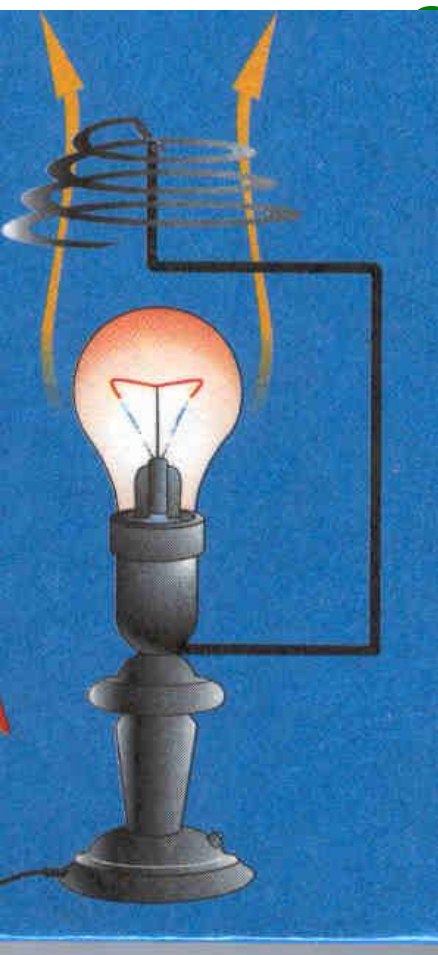
Механизм теплопроводности

Перенос теплоты теплопроводностью может происходить в любых средах (жидкости, газы, твердые тела). В чистом виде – **в твердых телах**

Теплопроводность в разных средах определяется:

- **в газах:** перенос кинетической энергии молекул при их хаотическом движении и столкновениях друг с другом
- **в жидкостях и твердых диэлектриках:** путем упругих колебаний;
- **в металлах:** перенос энергии свободными электронами.

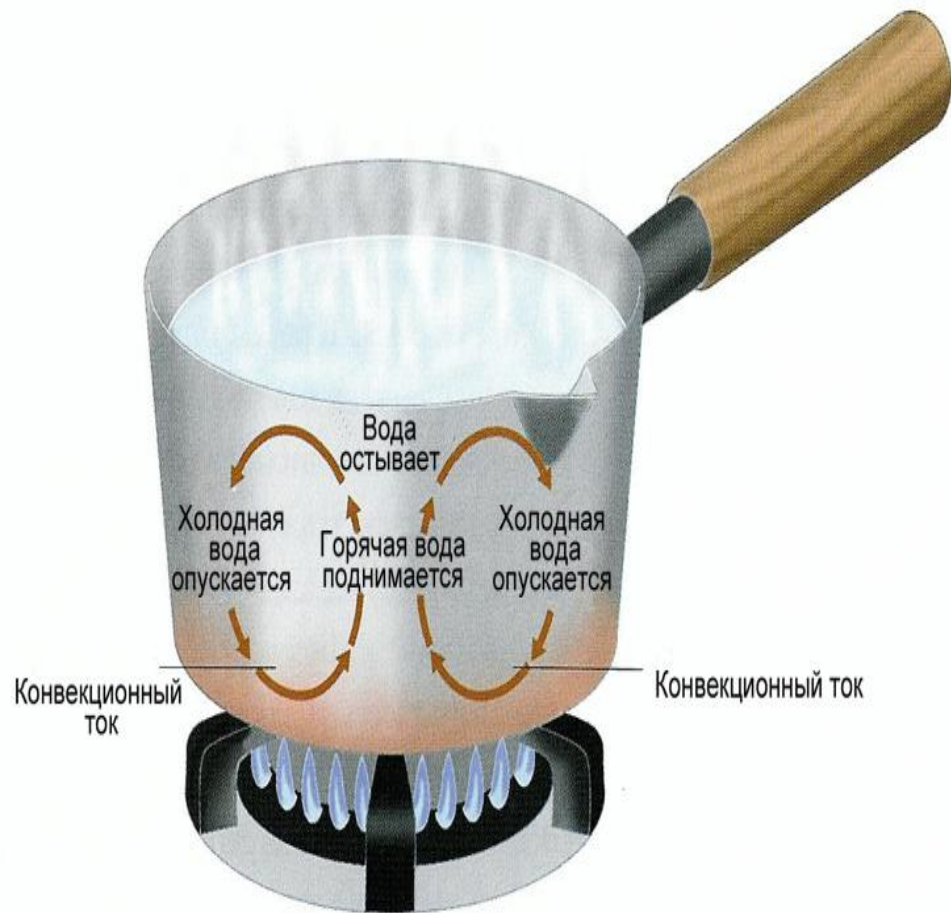
Механизм конвекции



Это перенос тепла струями
жидкости или газа.

Конвекция в твердых телах и вакууме
происходить не может

Механизм конвекции в жидкостях

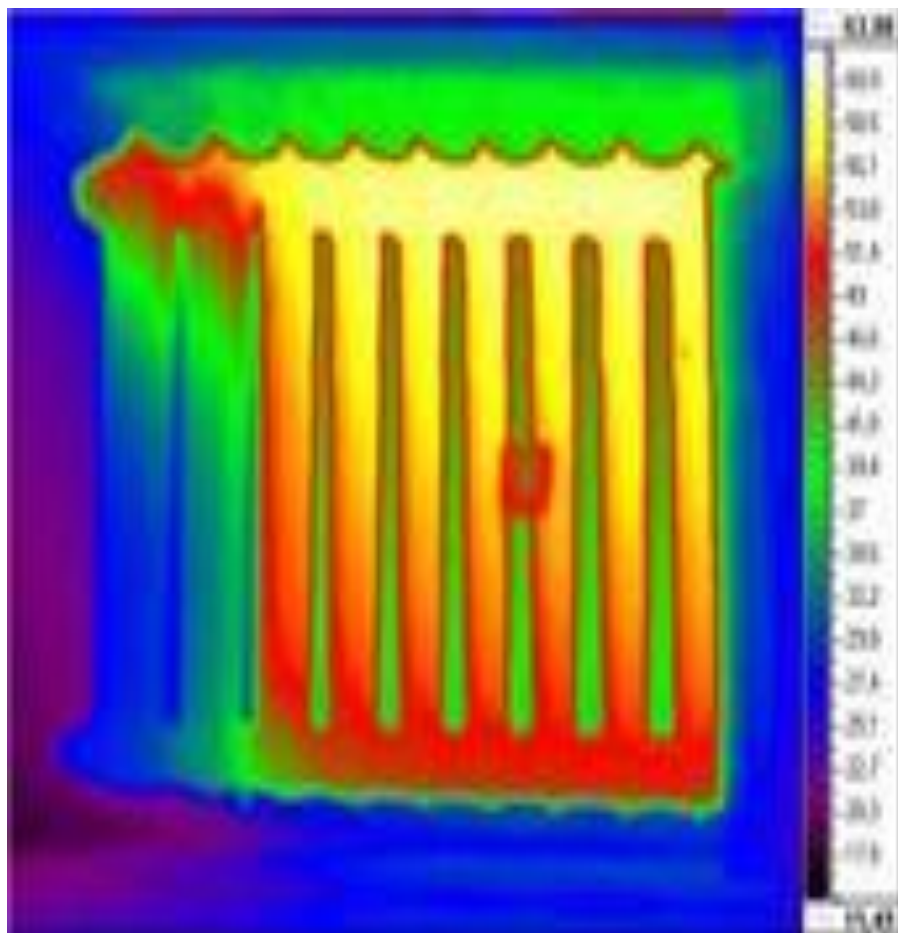


А – жидкость нагревается и вследствие уменьшения ее плотности, движется вверх.

В – нагретая жидкость поднимается вверх.

С – на место поднявшейся жидкости приходит холодная, процесс повторяется.

Тепловое излучение



Перенос теплоты осуществляется электромагнитными волнами. Происходит двойное преобразование энергии. Энергия теплового движения молекул преобразуется в энергию электромагнитного излучения. Поглощение электромагнитного излучения другим телом превращает ее в энергию теплового движения молекул. Воздух, через который передается тепловое излучение, практически не нагревается.

Механизм излучения



Температура Солнца очень высока, поэтому оно излучает много энергии

Нагретые тела излучают электромагнитные волны в различных диапазонах.

Излучение может распространяться и в вакууме

Теплообменные процессы

- Теплопроводность;
- Лучистый теплообмен;
- Теплоотдача;
- Теплопередача



Теплопроводность

Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Условия однозначности. Теплопроводность однослойной и многослойной плоской и цилиндрической стенок. Теплоизоляционные материалы.

Теплопроводность

- Распространение тепла теплопроводностью (**закон Био – Фурье**): количество тепла, возникающего в теле вследствие теплопроводности при некоторой разности температур в отдельных частях тела, прямо пропорционально градиенту температуры, времени проведения процесса и площади сечения, перпендикулярного направлению теплового потока.

Закон Био-Фурье

$$dQ = -\lambda \cdot dF \cdot \text{grad} t \cdot d\tau,$$

где dQ – количество тепла, Дж;

λ - коэффициент пропорциональности,
коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

$\text{grad} t$ – градиент температуры, К/м;

$d\tau$ – время, с;

dF – поверхность теплообмена,
перпендикулярная тепловому потоку, $м^2$

.

Коэффициент теплопроводности

- Коэффициент теплопроводности - физическая характеристика, указывает на способность данного тела проводить тепло.
- Количественно коэффициент теплопроводности равен количеству тепла, проходящего в единицу времени τ через единицу изотермической поверхности F в стационарном температурном поле, при единичном градиенте температур,:

$$\lambda = \frac{Q}{\text{grad}t \cdot F};$$

- Коэффициент теплопроводности зависит от природы и агрегатного состояния вещества, от температуры и давления.
- Для газов возрастает с повышением температуры и мало зависит от давления;
- Для жидкости – уменьшается с увеличением температуры;
- Для твердых тел – увеличивается с повышением температуры.

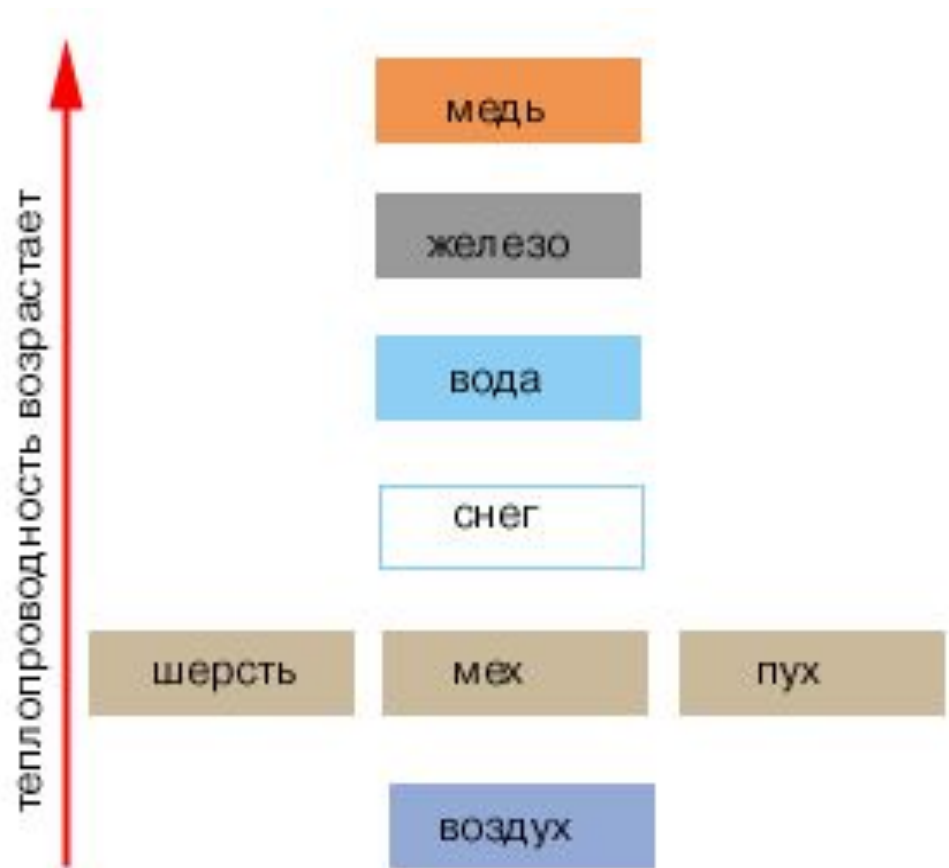
$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + b\Delta t)$$

Теплопроводность веществ

Металлы
обладают хорошей
теплопроводностью

Меньшей - обладают жидкости

Газы плохо проводят тепло



$$\frac{\text{теплопроводность меди}}{\text{теплопроводность воздуха}} = 20\,000$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности

- Уравнение выводится на основе закона сохранения энергии, считая, что тело однородно и изотропно (одинаковость физических свойств). Физические параметры ρ , λ , c – постоянны.
- Согласно закону сохранения энергии вся теплота, внесенная из вне в элементарный объем путем теплопроводности за время dt , идет на изменение внутренней энергии вещества в этом объеме:

$$dQ_{\lambda} = dU$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \cdot a = \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

где a – коэффициент температуропроводности, физический параметр вещества, $\text{м}^2/\text{с}$; $a = \frac{\lambda}{\rho c}$

- Уравнение гласит – изменение температуры во времени для любой точки тела пропорционально величине a .

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + q_u$$

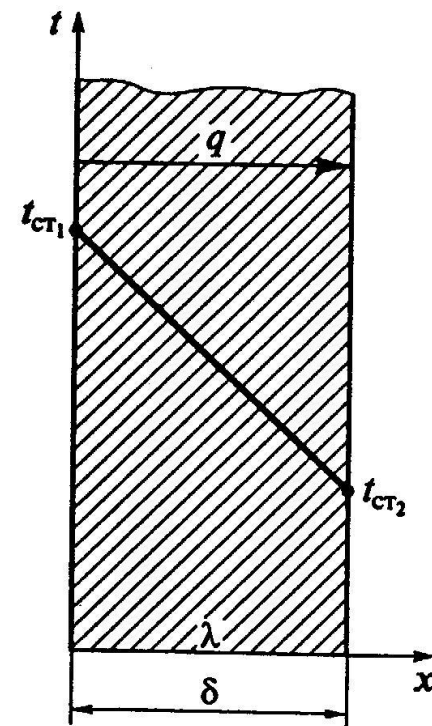
Условия однозначности

- **Геометрические** – характеризуют форму и размеры тела в котором протекает процесс;
- **Физические** – характеризуют физические свойства тела;
- **Временные** – характеризуют распределение температуры в начальный момент времени;
- **Граничные** – характеризуют взаимодействие тела с окружающей средой

Теплопроводность через плоскую стенку

- Толщина стенки δ ;
- Температура на наружных поверхностях : $t_1 > t_2$;
- $\lambda = \text{const}$;
- Режим стационарный

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$$



δ

$$dQ = -\lambda \cdot dF \cdot \text{grad}t \cdot dt$$

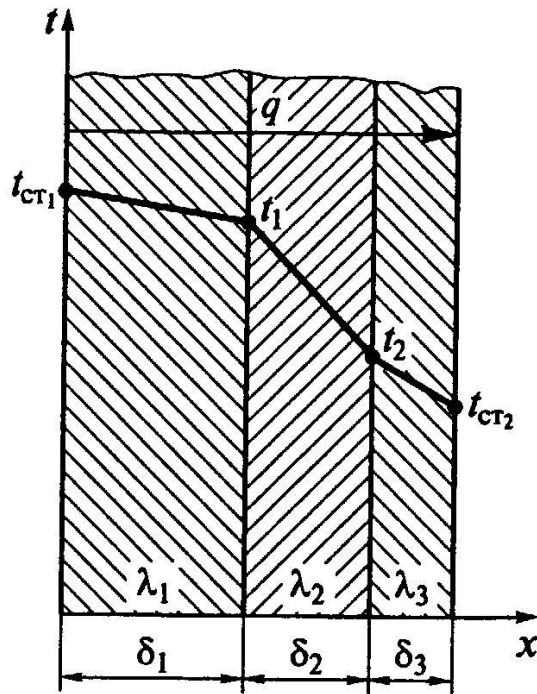
- Уравнение теплопроводности для однослойной плоской стенки для стационарного процесса:

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} F$$

- Уравнение теплопроводности для многослойной плоской стенки:

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\sum \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)} F$$

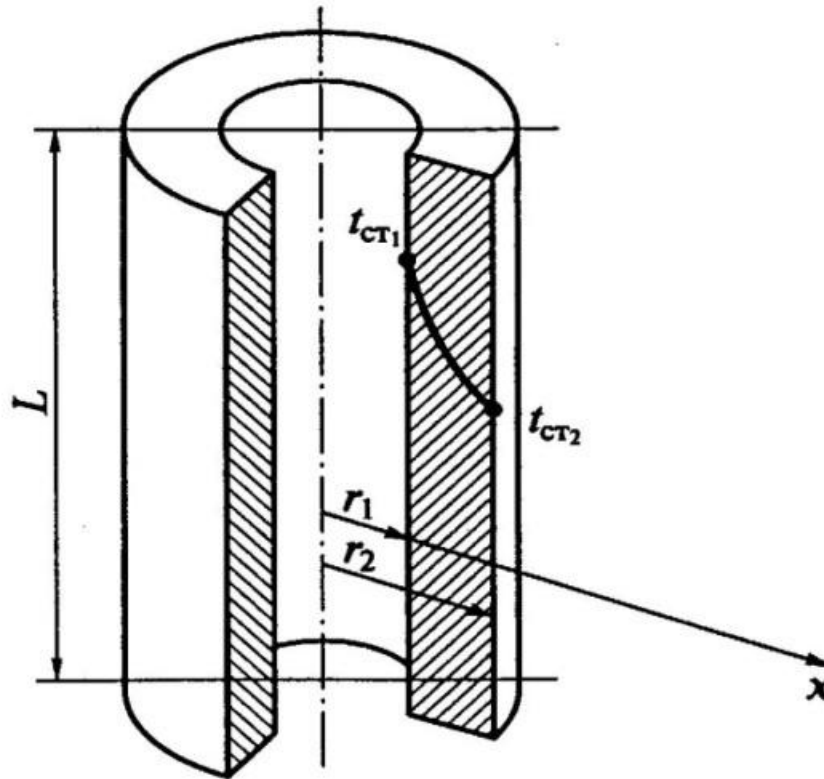
Уравнение теплопроводности для многослойной плоской стенки



$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\sum \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)} F$$

$$Q = \frac{t_{ст1} - t_{ст2}}{\sum \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}$$

Распределение температур по толщине цилиндрического слоя



Закон теплопроводности для цилиндрического слоя для стационарного режима

- Уравнение теплопроводности цилиндрической однослойной стенки :

$$Q = \frac{\pi \cdot L \cdot \Delta t}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

- Уравнение теплопроводности многослойной цилиндрической стенки:

$$Q = \frac{\pi \cdot L \cdot \Delta t}{\sum \left(\frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)}$$

Лучистый теплообмен

Физические основы

A decorative graphic element consisting of several horizontal lines of varying lengths and colors (teal, light blue, white) extending from the right side of the slide towards the center.

Общие понятия лучистого теплообмена

Лучистый теплообмен имеет место в ракетной технике, ядерной энергетике, металлургии, гелиотехнике и др.

Тепловое излучение – передача внутренней энергии излучающего тела посредством электромагнитных волн, которые характеризуются длиной волны λ .

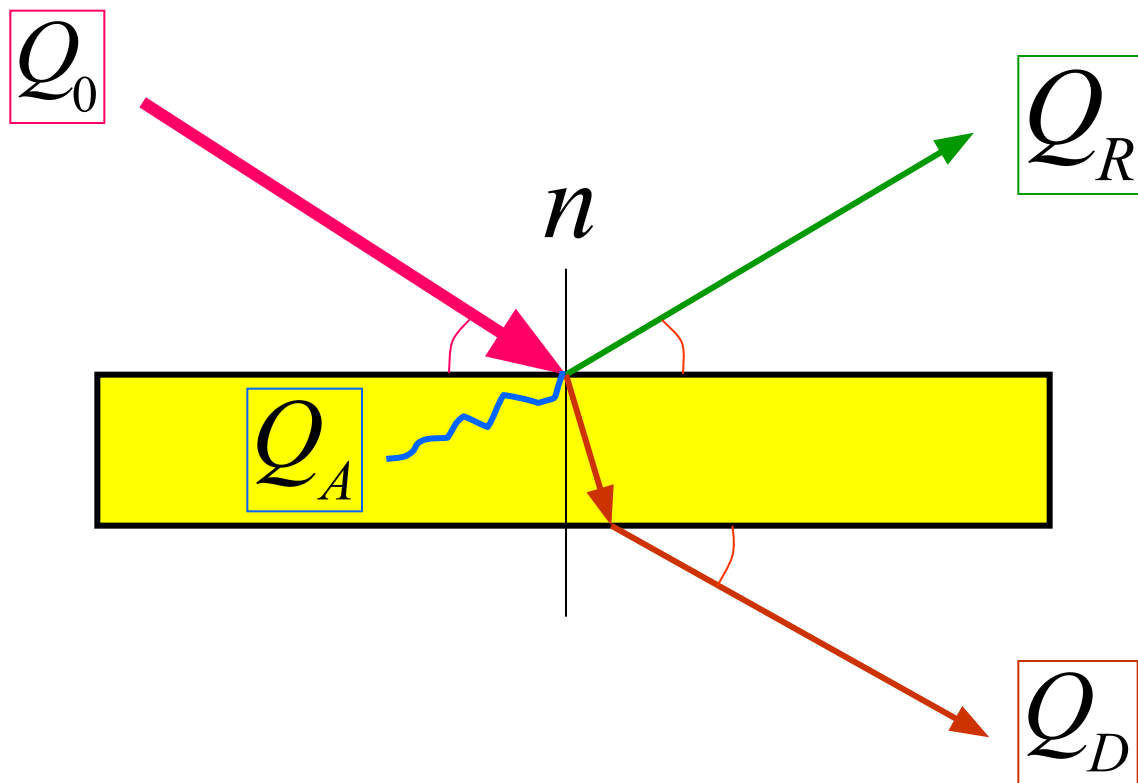
Не все электромагнитные волны относятся к тепловому излучению.

Тепловыми лучами являются те из них, которые при попадании на поверхность превращаются в теплоту: видимое излучение (свет) с длиной волны $\lambda = 0,4 - 0,8$ мкм и инфракрасное - с $\lambda = 0,8$ мкм – 0,8 мм.

Лучистый теплообмен

- Процесс распространения тепла в виде электромагнитных волн.
- Все тела обладают способностью излучать энергию, поглощать энергию и превращать ее в тепловую.
- Тепловое излучение имеет одинаковую природу со световым.

Тепловой баланс лучистого теплообмена



- В однородном пространстве тепло распространяется прямолинейно;
- Попадая на тело частично поглощается, частично отражается, частично проходит сквозь тело без изменений:
- $Q_o = Q_A + Q_R + Q_D$

$$Q_{л} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{пр}}$$

Абсолютно черное тело

Абсолютно черное тело

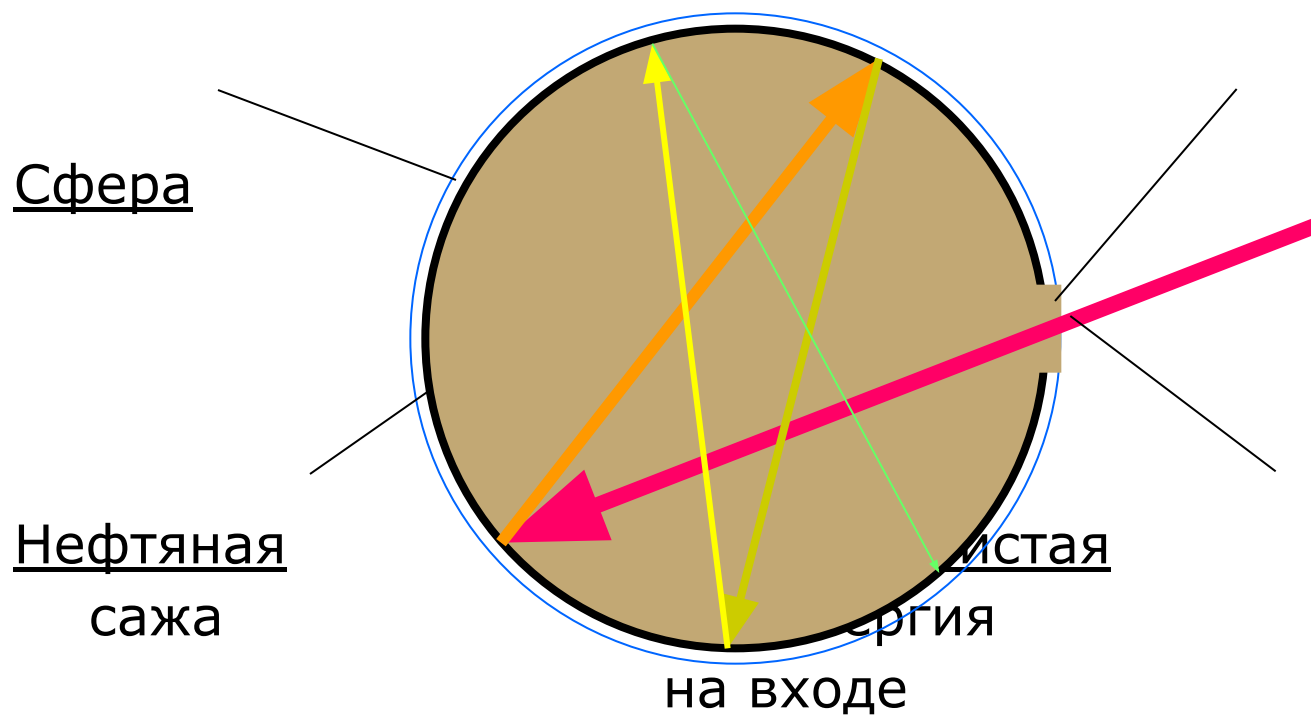
поглощает всю падающую на него лучистую энергию.

В природе и технике нет абсолютно черных тел. Все реальные тела – «серые».

Моделью абсолютно черного тела является отверстие в полом шаре, внутренняя поверхность которого покрыта нефтяной сажей, что дает поглотительную способность

$$A = 0,95$$

Модель абсолютно черного тела



Характеристики теплового излучения

- **Лучеиспускательная способность** – количество энергии, излучаемой единицей поверхности тела в единицу времени во всем интервале длин волн:

$$E = Q_{\text{л}} / (F \tau)$$

- Лучеиспускательная способность абсолютно черного тела пропорциональна абсолютной температуре его поверхности в 4-ой степени (**закон Стефана Больцмана**):

$$E_0 = K_0 T^4$$

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

где K_0 - константа лучеиспускания абсолютно черного тела,
 c_0 - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела

Интенсивность лучистого потока

- Интенсивность общего лучистого потока зависит от 4-ой степени абсолютной температуры излучающего тела, его излучающей способности и степени черноты серого тела:

$$q_{\text{л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon T^4 = \varepsilon 5,67 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

Закон Кирхгофа

- Отношение лучеиспускательной способности тел к их поглотительной способности для всех тел одинаково и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же температуре:

$$E_o = E_c / A$$

Особенности лучистого теплообмена в разных средах

Большинство твердых и жидких тел имеют сплошной спектр излучения, они испускают энергию всех длин волн от нуля до бесконечности.

Чистые металлы и газы обладают выборочным (селективным) излучением, испускают энергию с прерывистым спектром.

В твердых и жидких телах лучистый теплообмен имеет поверхностный характер, в лучистом теплообмене участвуют лишь поверхностные слои.

Газы имеют объемный характер лучистого теплообмена, в нем участвуют все частицы газа.

- Чем выше температура излучающего тела, тем в более короткой области длин волн лежит максимум излучения.
- Лучистый теплообмен становится заметным по сравнению с конвективным при температуре больше 400 С

- Лучеиспускающая способность газов зависит от объема, вида газа и температуры в степени 3-3,5;
- Газы излучают объемом;
- Газы излучают в определенной части спектра;
- Лучеиспускающая способность смеси газов ниже, чем отдельного газа.