



# Физика

Преподаватель

Соколов Александр Николаевич

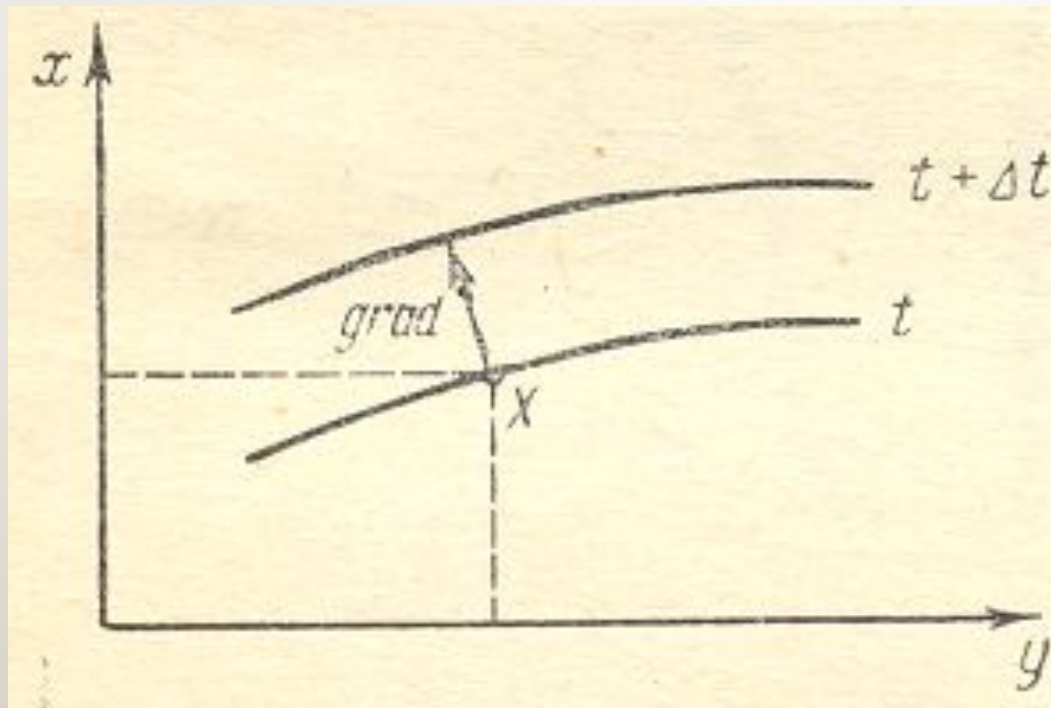
# Лекция 2 - Тезисы

- Виды теплопередачи
- Уравнение теплопроводности
- Теплообмен на поверхностях ограждения

# Температурное поле

- одновременное распределение температур в рассматриваемой среде

Изолинии температур двумерного поля:  $x, y$  –  
направление координат  $t = f(x, y)$



# Градиент температуры

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial x} i + \frac{\partial t}{\partial y} j + \frac{\partial t}{\partial z} k$$

- Тепловой поток – количество теплоты переносимое за единицу времени

$$Q, \text{ Вт}$$

- Плотность теплового потока – количество теплоты, переносимое за единицу времени через единицу площади

$$q, \text{ Вт/м}^2$$

Однородное температурное поле в плоской протяжённой  
стене:

$t = f(x)$ ;  $t$  – изолинии температур;  $Q$  – направление потока  
тепла

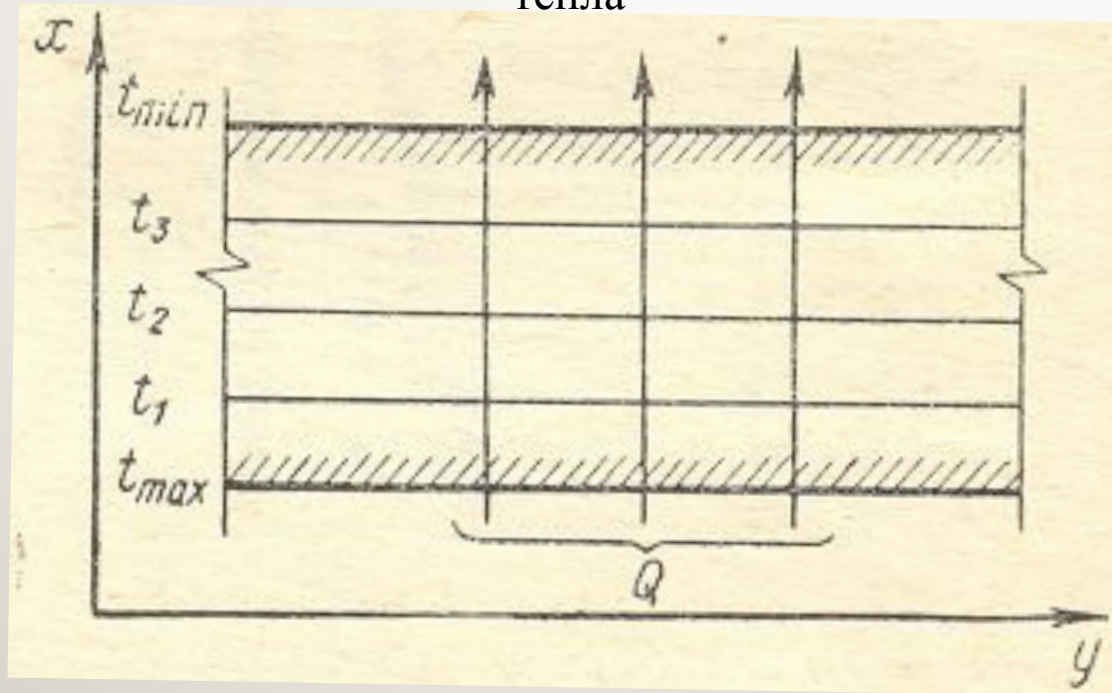
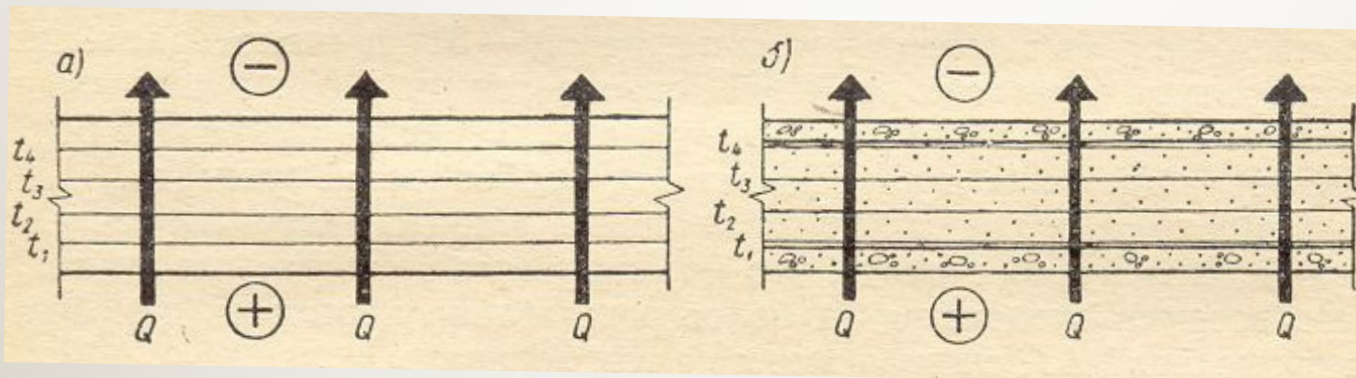


Схема распределения температур и одномерного направления потоков  
тепла в плоских ограждающих конструкциях, однородных в  
теплофизическом отношении



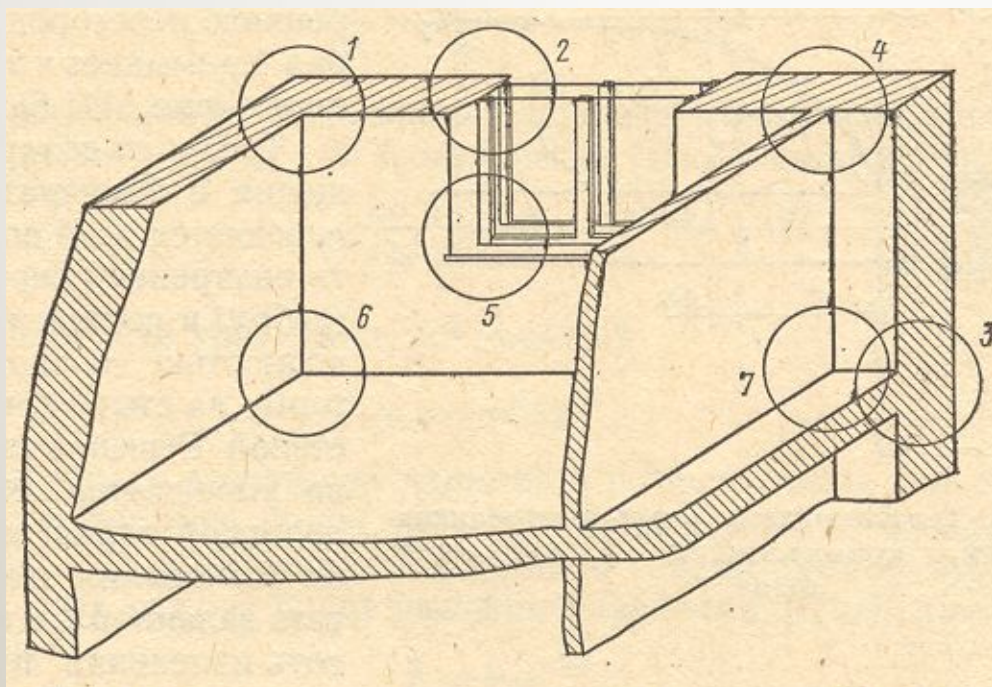
$t_1-t_4$  - изолинии распределения температур;  $Q$  – одномерное направление потока  
тепла нормальное к изолиниям температур

а – конструкция, выполненная из одного материала;

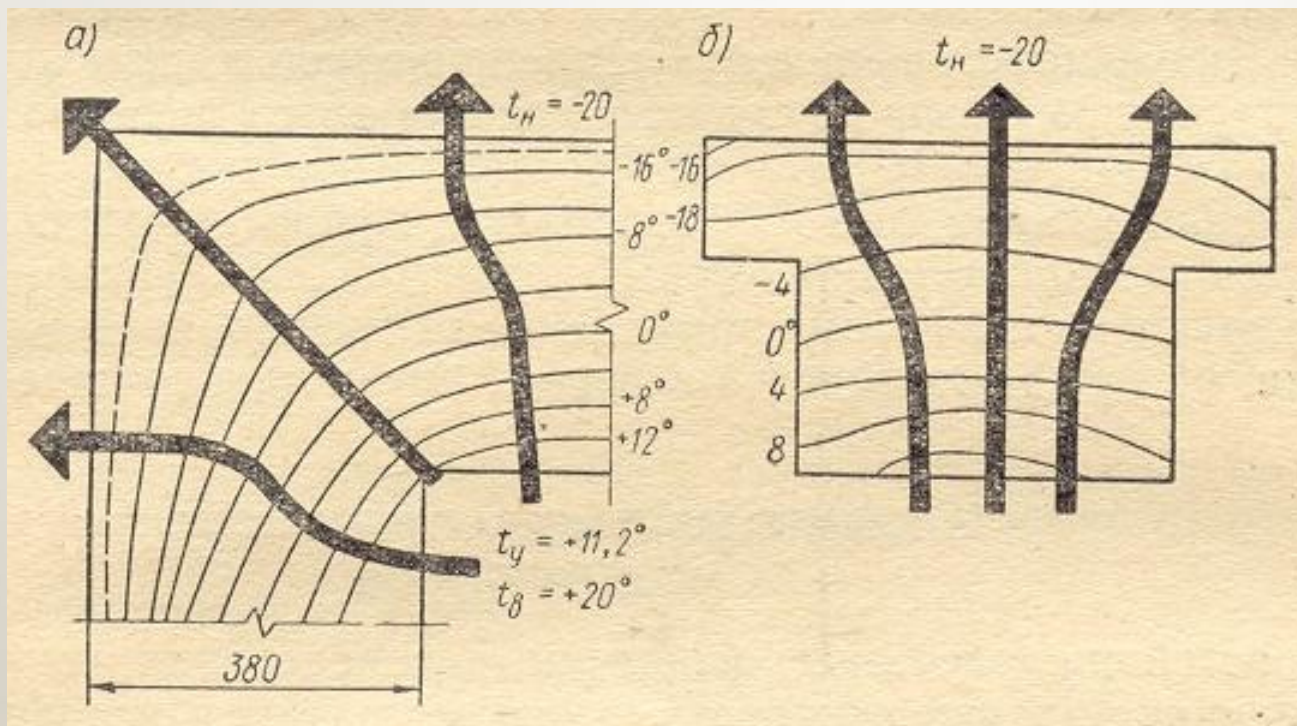
б – конструкция слоистая, выполненная из различных материалов;



Элементы формирования двумерных (1, 2, 3, 4) и трёхмерных (5, 6, 7) температурных полей в наружных ограждениях здания



Двумерные (плоские) температурные поля геометрически сложных элементов однородных наружных стен: *а* – наружного угла; *б* - простенка



# Виды теплопередачи

- Теплопроводность
- Конвекция
- Излучение

# Виды теплопередачи

- Теплопроводность

- теплообмен между непосредственно соприкасающимися частицами среды с различной температурой, при котором происходит обмен энергией теплового движения структурных частиц (молекул, атомов, свободных электронов)
- Теплопроводность не связана с переносом вещества

М

СТИ

Верхний  
холодильник

Охранное  
кольцо

Теплоизоляция

Нижний  
холодильник



Верхний  
реватель

Средний  
реватель

Образец

Нижний  
реватель

# Решение задач теплопроводности связано с определением

$$t = f(x, y, z)$$

уравнение Лапласа

$$t = f(x, y, z, \theta)$$

уравнение Фурье

$$Q = \lambda(\Delta t / \delta) \cdot S \cdot \theta, \text{Дж}$$

- Количество тепла, проходящее через слой площадью  $S$  толщиной  $\delta$  за время  $\theta$  при разности температур  $\Delta t$ .
- Коэффициент теплопроводности материала характеризует способность материала в той или иной степени проводить тепло через свою массу

$$\lambda = Q \cdot \frac{\delta}{(\Delta t \cdot S \cdot \theta)}, \text{Вт/(мК)}$$

- количество тепла, проходящее за 1 с через 1 м<sup>2</sup> слоя толщиной 1 м при разности температур на границах слоя в 1 градус

Решение задач теплопроводности связано  
с определением

$$t = f(x, y, z) \quad \text{уравнение Лапласа}$$

$$t = f(x, y, z, \Theta) \quad \text{уравнение Фурье}$$

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t$$



**Дифференциальное уравнение  
теплопроводности (уравнение Фурье)  
при отсутствии внутренних источников  
тепла**

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \nabla^2 t$$

# Коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \left[ \frac{\text{М}^2}{\text{с}} \right]$$

**Дифференциальное уравнение  
теплопроводности (уравнение Фурье)  
при отсутствии внутренних источников  
тепла**

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

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = a \cdot \nabla^2 t$$

**Дифференциальное уравнение  
теплопроводности при одномерном  
распространении тепла (в направлении  $x$ )  
уравнение Фурье**

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Дифференциальное уравнение  
теплопроводности при одномерном  
распространении тепла (в направлении  $x$ )  
уравнение Фурье

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

# Физический смысл уравнения Фурье

в каждой точке среды  
изменение температуры во времени  
пропорционально  
пространственному изменению градиента  
температуры

В случае неоднородного материала

$$q = -\lambda(x) \frac{dt}{dx}$$

$$\frac{dq}{dx} = -\frac{d}{dx} \left[ \lambda(x) \frac{dt}{dx} \right]$$

# Нелинейное уравнение теплопроводности с переменными коэффициентами

$$c\rho(x) \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right]$$

$$c\rho(x, y, z) \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x, y, z) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(x, y, z) \frac{\partial t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(x, y, z) \frac{\partial t}{\partial z} \right]$$



# Уравнение Фурье

является

уравнением нестационарного поля  
любого потенциала переноса

При стационарных условиях

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

**Дифференциальное уравнение температурного**

**поля**

**при стационарных условиях**

**уравнение Лапласа**

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0$$

# Физический смысл уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

$$- \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0$$

# При одномерной передаче тепла через однородный слой

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0$$

- $t = f(x)$  – линейная функция

- Плотность теплового потока  $q = \text{Const}$

# Плотность теплового потока

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t$$

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

Для плоского однородного слоя

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0$$

Граничные условия:

$$x = 0 \quad t = \tau_1$$

$$x = \delta \quad t = \tau_2$$

$$t = \tau_1 - \frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta} x$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (\tau_1 - \tau_2)$$



Интегрируем

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0$$

$$\frac{dt}{dx} = C_1$$

$$t = C_1 x + C_2$$

$$t = C_1 x + C_2$$

Из граничных условий

$$x = 0 \quad t = \tau_1 \quad C_2 = \tau_1$$

$$x = \delta \quad t = \tau_2 \quad \tau_2 = C_1 \delta + C_2$$

$$C_1 = -\frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta}$$

# Распределение температур по толщине слоя

$$t = C_1 x + C_2$$

$$t = -\frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta} x + \tau_1$$

$$t = \tau_1 - \frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta} x$$

## Плотность теплового потока

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

$$\frac{dt}{dx} = C_1 = -\frac{\tau_1 - \tau_2}{\delta}$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (\tau_1 - \tau_2)$$

# Термическое сопротивление

$$R = \frac{\delta}{\lambda}$$

В случае неоднородного материала

$$c\rho(x)\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right]$$

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right] = 0$$

$$R = \frac{x}{\lambda} \quad \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} = 0$$

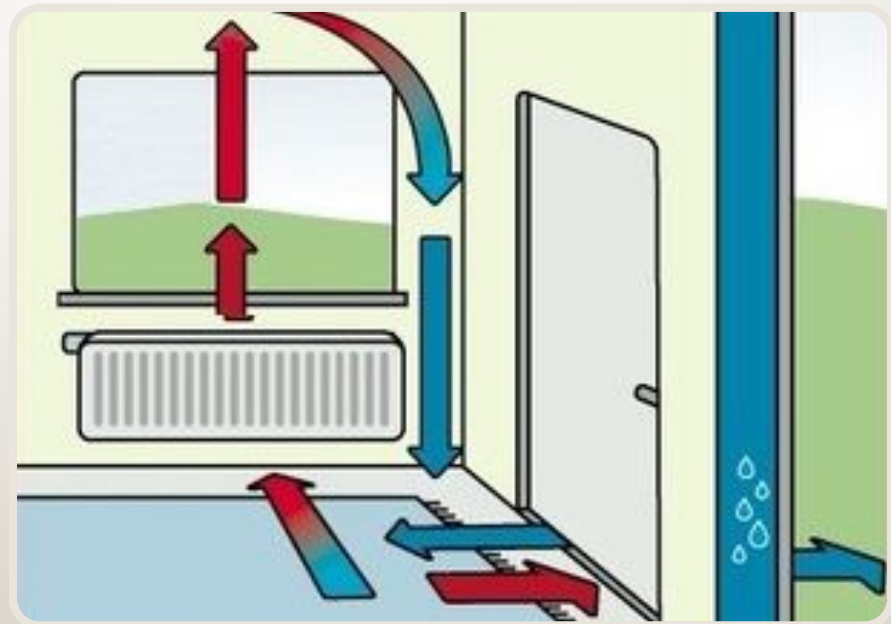
# Конвекция

– перенос тепла движущимися частицами жидкости или газа. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью

$$q = f(\Delta t, v)$$

Естественная конвекция – движение обусловлено разностью температур, следовательно неодинаковой плотностью

## Конвекция





# Конвекция



Вынужденная конвекция —  
движение частиц вызвано  
внешним воздействием

# Излучение



- – перенос энергии в виде электромагнитных волн между двумя взаимно излучающими поверхностями (различно нагретыми поверхностями твёрдых тел, разделённых лучепрозрачной средой)

# Виды теплопередачи

- Излучение

**закон Стефана – Больцмана**

$$R = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$$

$$q = \sigma T^4 = 5,67(T_1/100)^4 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$$

$$q = \sigma \varepsilon T_1^4 = 5,67\varepsilon (T_1/100)^4 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$$

Материал	Степень черноты
Кирпич красный, мрамор шлифованный, штукатурка, рубероид и т.д.	0.91-0.94
Краски малярные	0.8
Гладкая поверхность бетона	0.6
Железо оцинкованное	0.28
Железо полированное	0.128
Алюминий	0.04-0.06

# Спектральная интенсивность

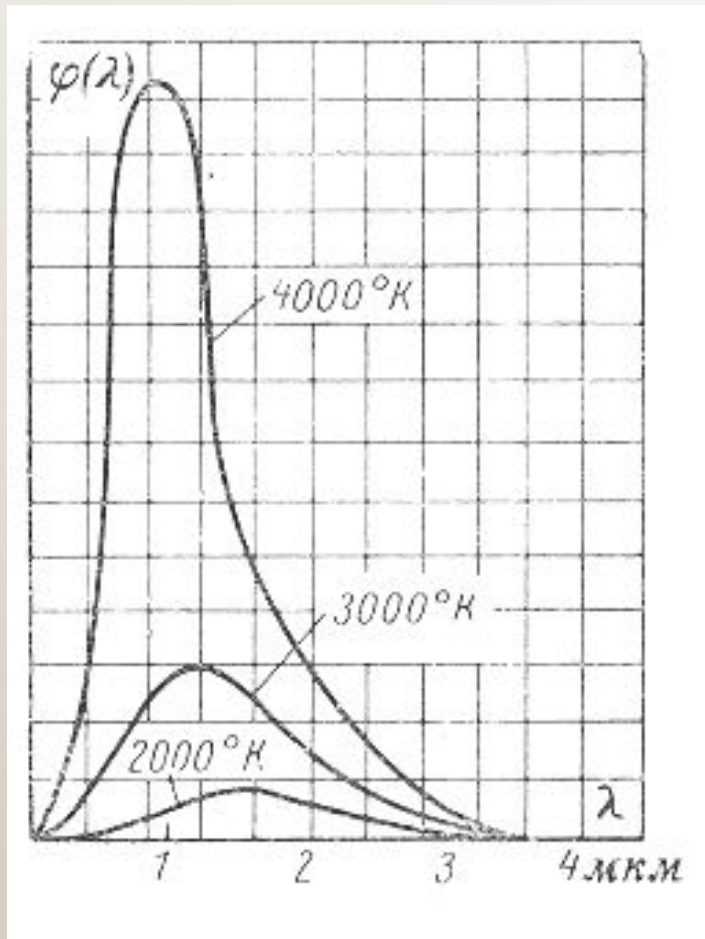
распределение излучаемой энергии по длинам волн характеризуется спектральной интенсивностью излучения

$$\varphi(\lambda) = \frac{dR}{d\lambda}$$

$$R = \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) d\lambda$$

## Кривые зависимостей спектральной интенсивности излучения

от **длины волны** для источников, имеющих различную температуру



$$R = \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) d\lambda$$

# Тепловое излучение

- Закон Вина  $T\lambda_{\max} = \text{Const}$

# Тепловое излучение

- Длины волн  $\lambda = 8 \cdot 10^{-7} \div 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
- При температуре  $0 \div 150^\circ \text{ C}$   
 $\lambda = (11 \div 7) \cdot 10^{-6} \text{ м}$



# Тепло, передаваемое излучением

$$R = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$$

$$\begin{aligned} q &= \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \\ &= 5,67((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4) \text{ (Вт}/\text{м}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q &= \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 5,67\varepsilon ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4) \text{ (Вт}/\text{м}^2) \end{aligned}$$

Тепло, передаваемое излучением от более нагретой поверхности  $S_1$  к поверхности  $S_2$

$$Q = 5,67 \varepsilon_{\text{ПР}} S_1 \psi \left( (T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right)$$

$\varepsilon_{\text{ПР}}$  — приведенный относительный коэффициент излучения при теплообмене между двумя серыми поверхностями

$\psi$  — угловой коэффициент излучения

# Теплопередача

– перенос тепла  
из одной воздушной среды  
(более нагретой)  
в другую (менее нагретую)  
через разделяющую эти среды ОК,  
включающий все виды теплообмена

# Тепловосприятие

– процесс теплообмена  
между поверхностью ОК  
и прилегающей к ней  
*нагретой* воздушной средой

# Теплоотдача

– процесс теплообмена  
между поверхностью ОК  
и прилегающей к ней  
*охлажденной* воздушной средой

# Теплообмен на поверхностях ограждения

$$q = \alpha \cdot \Delta t$$

$$\alpha = \alpha_{\kappa} + \alpha_{\lambda}$$

Коэффициенты теплоотдачи  
внутренней и наружной  
поверхностей

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{q}{(t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}})}$$
$$\alpha_{\text{н}} = \frac{q}{(\tau_{\text{н}} - t_{\text{н}})}$$
$$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

# Количество теплоты, передаваемое конвекцией, зависит от

- Разности температур воздуха и поверхности
- Характера движения воздуха



# Конвекция

- У внутренней поверхности – *естественная*
- У наружной поверхности – *вынужденная*

# Коэффициент теплообмена конвекцией $\alpha_{вк}$ на внутренней поверхности

- Потолок
- Стены
- Пол

Таблица 4\*

Внутренняя поверхность ограждающих конструкций	Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{в}$ , Вт/(м <sup>2</sup> · °С)
1. Стен, полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты $h$ ребер к расстоянию $a$ между гранями соседних ребер $\frac{h}{a} \leq 0,3$	8,7
2. Потолков с выступающими ребрами при отношении $\frac{h}{a} > 0,3$	7,6
3. Зенитных фонарей	9,9

Примечание. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{в}$  внутренней поверхности ограждающих конструкций животноводческих и птицеводческих зданий следует принимать в соответствии со СНиП 2.10.03-84.

Таблица 6\*

Наружная поверхность ограждающих конструкций	Коэффициент теплоотдачи для зимних условий $\alpha_n$ , Вт/(м <sup>2</sup> · °С)
1. Наружных стен, покрытий, перекрытий над проездами и над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в Северной строительной-климатической зоне	23
2. Перекрытий над холодными подвалами, сообщающимися с наружным воздухом; перекрытий над холодными (с ограждающими стенками) подпольями и холодными этажами в Северной строительной-климатической зоне	17
3. Перекрытий чердачных и над неотапливаемыми подвалами со световыми проемами в стенах, а также наружных стен с воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом	12
4. Перекрытий над неотапливаемыми подвалами без световых проемов в стенах, расположенных выше уровня земли, и над неотапливаемыми техническими подпольями, расположенными ниже уровня земли	6