



Физика

Преподаватель

Соколов Александр Николаевич

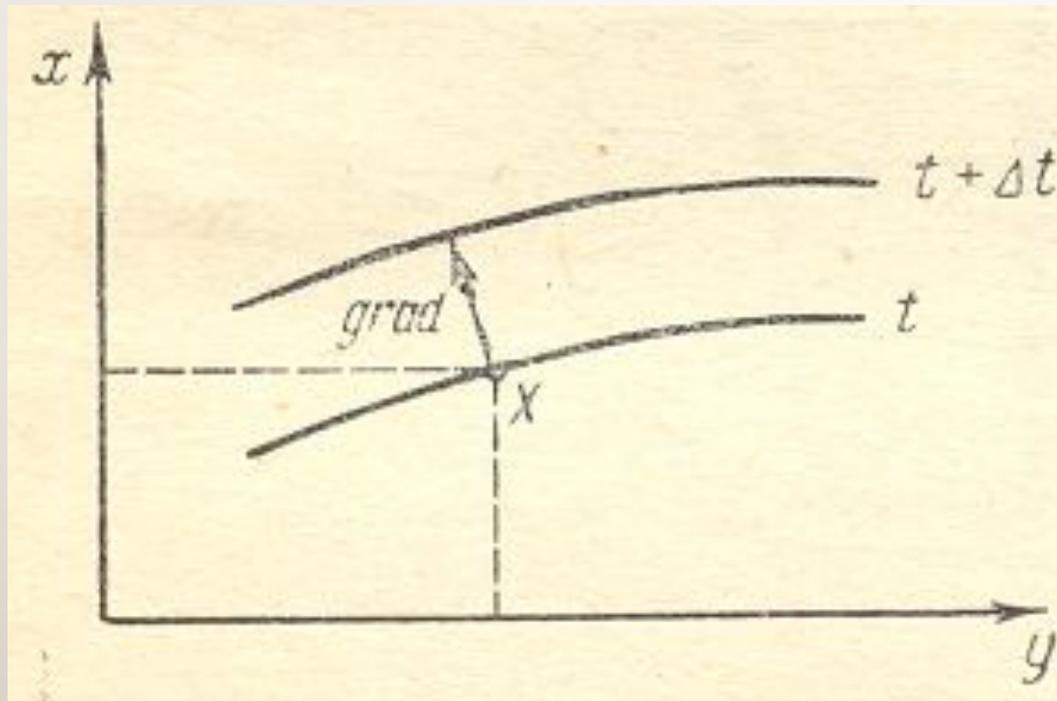
Лекция 2 - Тезисы

- 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

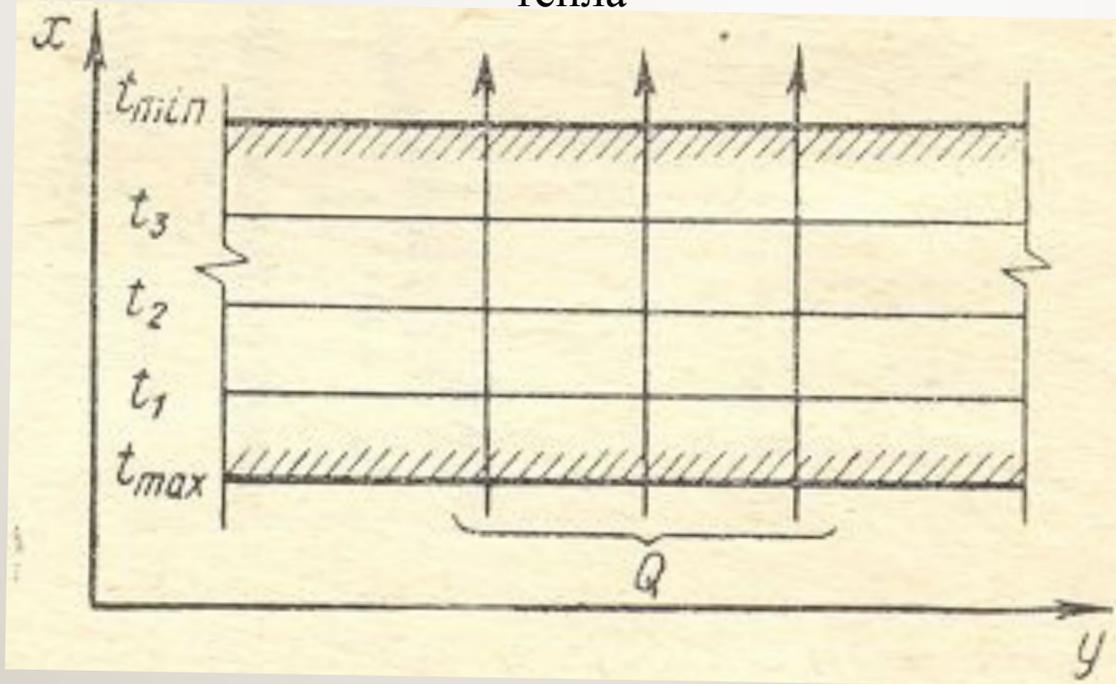
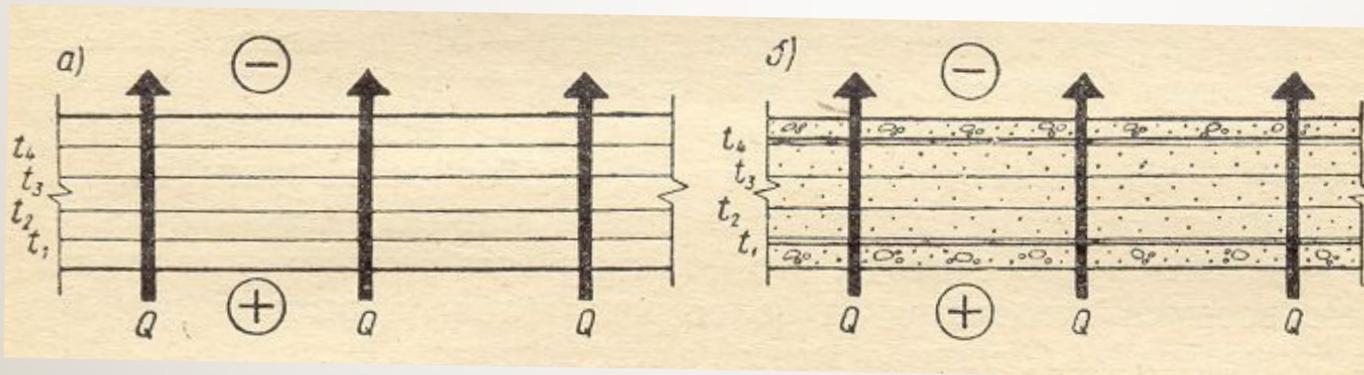


Схема распределения температур и одномерного направления потоков
тепла в плоских ограждающих конструкциях, однородных в
теплофизическом отношении

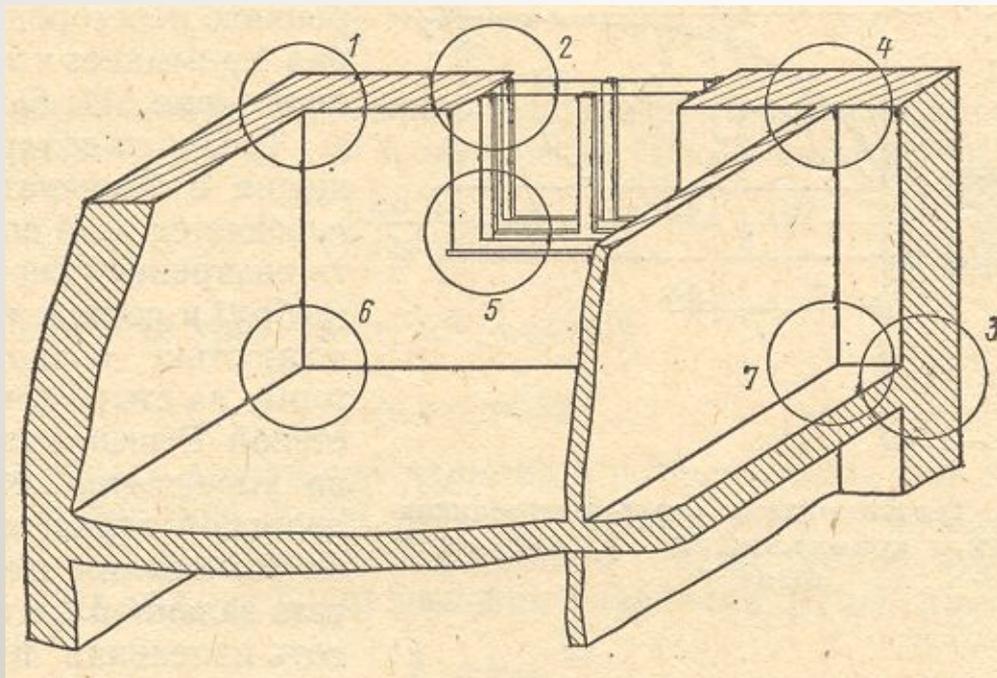


t_1-t_4 - изолинии распределения температур; Q – одномерное направление потока
тепла нормальное к изолиниям температур

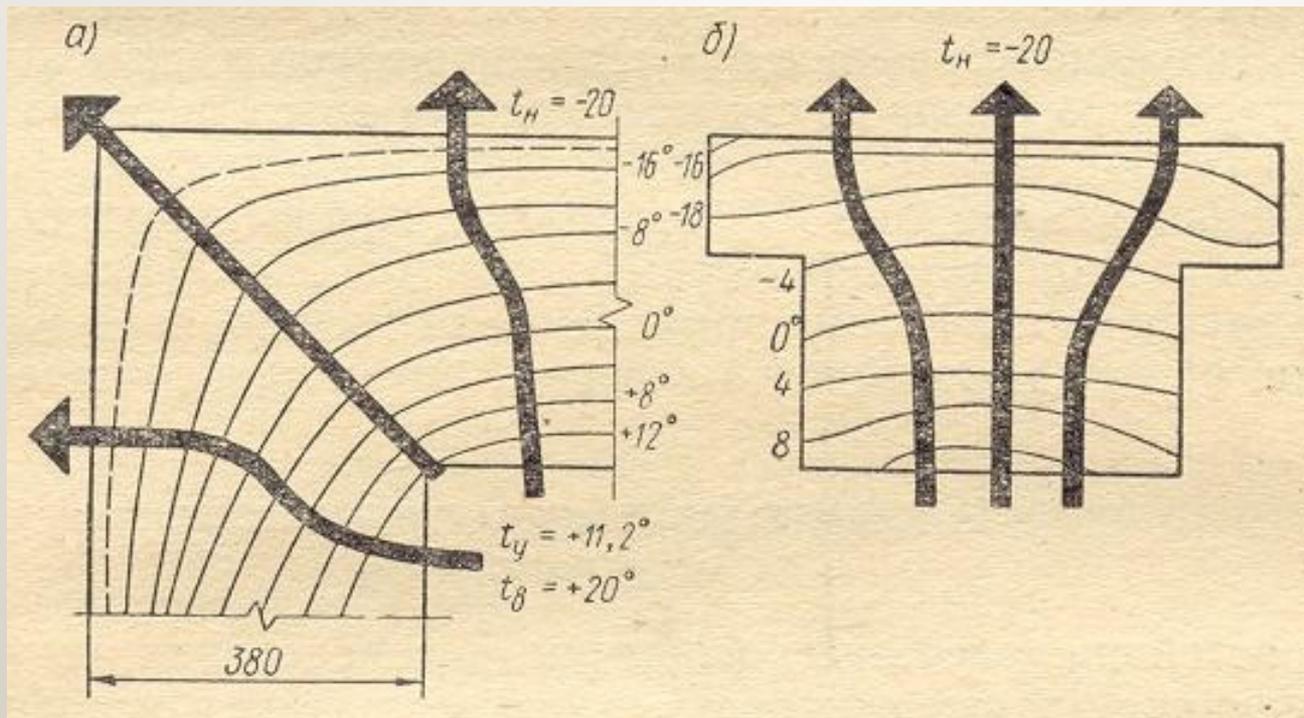
a – конструкция, выполненная из одного материала;

$б$ – 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
холодиль

Охранное
кольцо

Теплоизоляция

Нижний
холодиль



Верхний
двигатель

Защитное
кольцо

Образец

Нижний
двигатель

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 δ за время θ при разности температур Δt .
- 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 м² 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

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

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

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

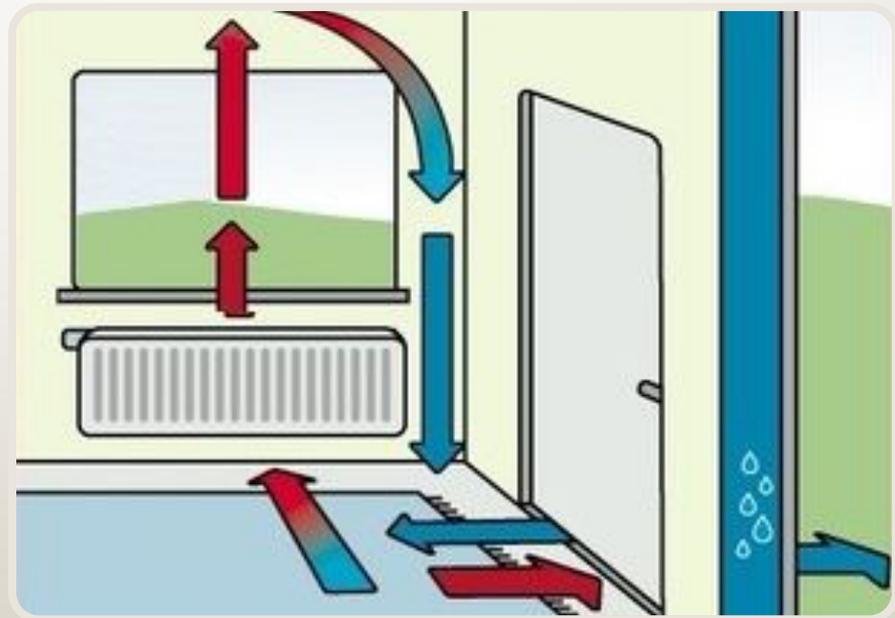
Конвекция

– 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

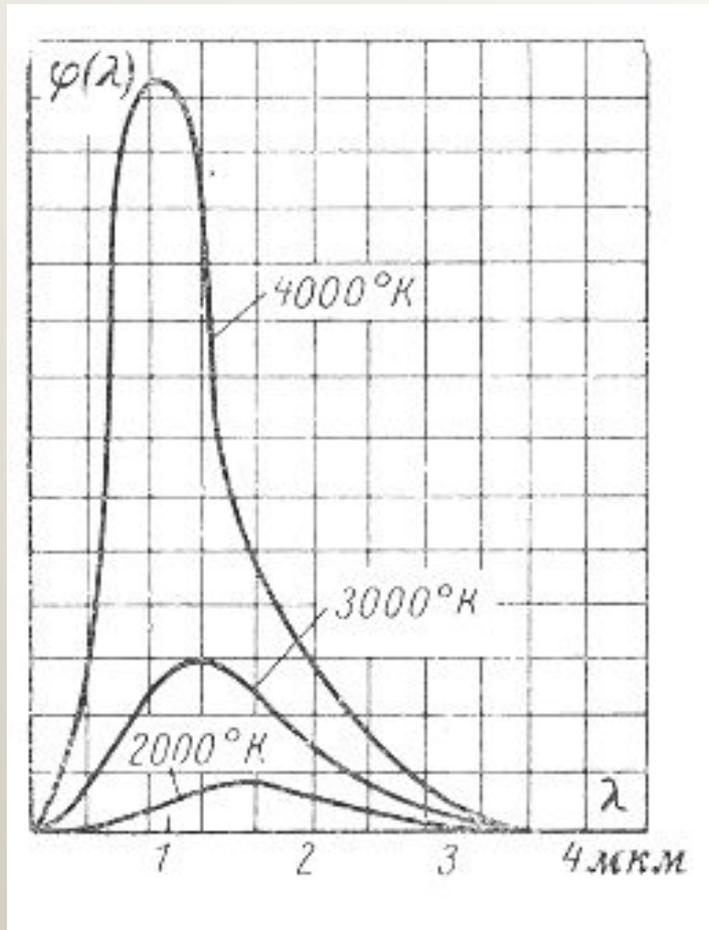
распределение излучаемой энергии по длинам волн характеризуется спектральной интенсивностью излучения

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ψ — 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 ² · °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 α_n , Вт/(м ² · °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