



МОСКОВСКИЙ  
ФИНАНСОВО-  
ЮРИДИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Теплогазоснабжение с основами теплотехники

## № 1. Основы теплотехники

Автор: Ефремов Герман Иванович, профессор, д.т.н.

Контакты: [efremov\\_german@mail.ru](mailto:efremov_german@mail.ru)

---

Москва – 2017



# Цели и задачи освоения дисциплины

- \* Целью освоения дисциплины «Теплогазоснабжение с основами теплотехники» является изучение фундаментальных и прикладных исследований в области теплогазоснабжения, достижение способности применения полученных знаний при расчётах систем теплогазоснабжения.
- \* Задачи освоения дисциплины включают в себя следующие положения:
- \* изучение основ гидравлики инженерных трубопроводных систем и сетей;
- \* получение представлений о проектировании, организации, технических, экономических и экологических требованиях при расчёте и создании внутренних систем теплогазоснабжения;
- \* изучение основ проектирования, расчёта и условий строительства систем наружного теплогазоснабжения;
- \* формирование умения строить профили наружных коммуникаций, представления о методах подготовки питьевой воды и очистки сточных вод.
- \* приобретение навыков системного анализа при решении технических, организационно-технологических и управленческих задач в области систем теплогазоснабжения

# Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

- \* Дисциплина «Теплогазоснабжение с основами теплотехники» относят к числу базовых дисциплин Блока 1 общей ООП бакалавриата по направлению 08.03.01. «Строительство» .
- \* Дисциплина «Теплогазоснабжение с основами теплотехники» предшествует дисциплинам «Технологические процессы в строительстве», «Обследование и испытание зданий».
- \* Для изучения дисциплин обучаемый должен обладать знаниями по математике, физике, химии.
- \* Изучение дисциплины базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин как, «Основы архитектуры и строительного проектирования».



# Основные разделы дисциплины

| <b>№</b> | <b>Наименование темы</b>                              |
|----------|---|
| 1.       | Основы теплотехники                                   |
| 2.       | Определение расходов теплоты                          |
| 3.       | Системы горячего водоснабжения                        |
| 4.       | Оборудование и расчет тепловых пунктов                |
| 5.       | Паровые системы теплоснабжения                        |
| 6.       | Тепловой режим открытых систем теплоснабжения         |
| 7.       | Автоматизированные системы управления теплоснабжением |
| 8.       | Системы газоснабжения и их расчет                     |

# Раздел 1: Основы теплотехники

## **Основы теплотехники**

1. Виды передачи теплоты: теплопроводность, конвекция, излучение.
2. Теплопроводность. Тепловой поток. Закон Фурье.
3. Теплопроводность через плоскую стенку.
4. Теплопроводность через цилиндрическую стенку.
5. Дифференциальное уравнение теплопроводности.
6. Конвективный теплообмен (естественная и вынужденная конвекцией)
7. Уравнение Ньютона-Рихмана.
8. Критериальные уравнения конвективного теплообмена.
9. Теплопередача через плоскую стенку.
10. Теплопередача через цилиндрическую стенку.
11. Теплообмен излучением.
12. Основные законы теплового излучения.

# Виды передачи теплоты

**Теплопроводность.** Происходит при непосредственном контакте тел или частицами тел с различными температурами и представляет собой молекулярный процесс передачи теплоты. При нагревании тела, кинетическая энергия его молекул возрастает и частицы более нагретой части тела, сталкиваясь с соседними молекулами, сообщают им часть своей кинетической энергии.

**Конвекция** – это перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретых жидкости или газа. При этом, перенос теплоты прямо пропорционально зависит от скорости движения жидкости или газа. Конвекция сопровождается всегда и теплопроводностью. В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют конвективной теплоотдачей.

**Излучение (радиация)** - процесс передачи теплоты внутренней энергии тела в виде электромагнитных волн. Этот процесс происходит в три стадии: превращение части внутренней энергии одного из тел в энергию электромагнитных волн, распространение этих волн в пространстве и поглощение энергии излучения другим телом.

Совместный теплообмен излучением и теплопроводностью называют *радиационно-кондуктивным*. Может быть совокупность всех трех видов теплообмена (**сложный теплообмен**).

# Теплопроводность

Рассматриваются только однородные и **изотропные тела**, которые обладают одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям. Совокупность значений температуры в данный момент времени для всех точек изучаемого пространства называется **температурным полем**:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

где:  $t$  – температура тела;  $x, y, z$  - координаты точки;  $\tau$  - время.

Температурное поле по уравнению (1) называется **нестационарным**, т.е. соответствует неустановившемуся тепловому режиму теплопроводности.

Если температура тела функция только координат и не изменяется с течением времени, то температурное поле называется **стационарным**

$$t = f(x, y, z). \quad (2)$$

**Изотермической поверхностью** называется поверхность тела с одинаковой температурой. Рассмотрим две изотермические поверхности (Рис. 1) с температурами  $t$  и  $t + \Delta t$ . **Градиентом температуры** называют предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  к расстоянию между изотермами по нормали  $\Delta n$ , когда он стремится к нулю:

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} [\Delta t / \Delta n] \Delta n = \partial t / \partial n \quad (3)$$

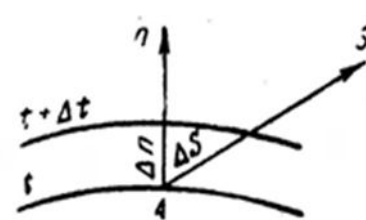


Рис.1

# Тепловой поток

**Тепловым потоком** –  $Q$ , (Вт=Дж/с) называют количество теплоты, проходящее через изотермическую поверхность  $F$  в единицу времени.

Тепловой поток, проходящий через единицу площади  $F$  называют **плотностью теплового потока** (удельный тепловой поток)

$$q = Q / F, \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (4)$$

Для твердых тел уравнение теплопроводности описывается **законом Фурье**: **Тепловой поток, передаваемая теплопроводностью, пропорционален градиенту температуры и площади сечения, перпендикулярного направлению теплового потока.** Знак минус показывает, что вектор теплового потока направлен противоположно температурному градиенту.

$$Q = - \lambda \cdot F \cdot \partial t / \partial n, \quad (5)$$

Где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, [Вт/(м·К)].

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  является физическим параметром вещества, характеризующим способность тела проводить теплоту, Он зависит от рода вещества, давления и температуры. Также на его величину влияет влажность вещества. Для большинства веществ коэффициент теплопроводности определяются опытным путем и для технических расчетов берут из справочной литературы.



# Теплопроводность через плоскую стенку

Плотность теплового потока по закону Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \quad (6)$$

Интегрируя получим

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (7)$$

$t_{\text{ст}2} - t_{\text{ст}1} = \Delta t$  - температурный напор;

$\delta = \Delta x$  - толщина стенки;

$R = \delta / \lambda$  - термосопротивление стенки.

$$t_{\text{ст}1} - t_{\text{ст}2} = q(\delta / \lambda). \quad (8)$$

Для многослойной стенки

$$t_1 - t_2 = q \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) \quad (9)$$

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad (10)$$

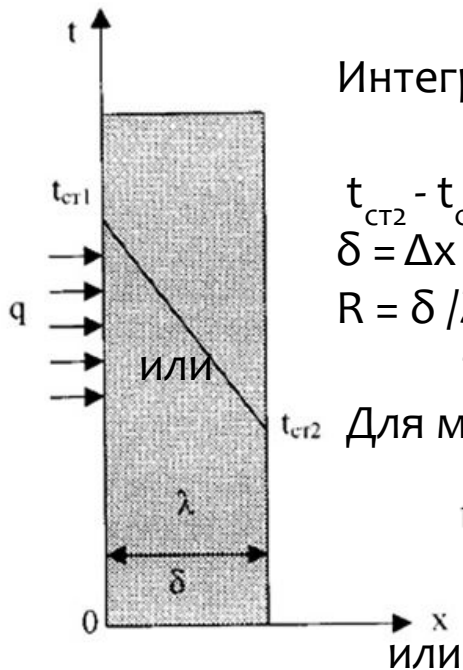


Рис. 2

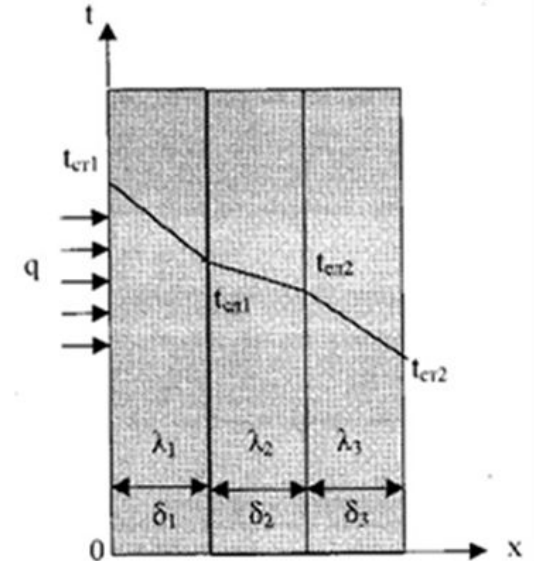


Рис. 3

# Теплопроводность через цилиндрическую стенку

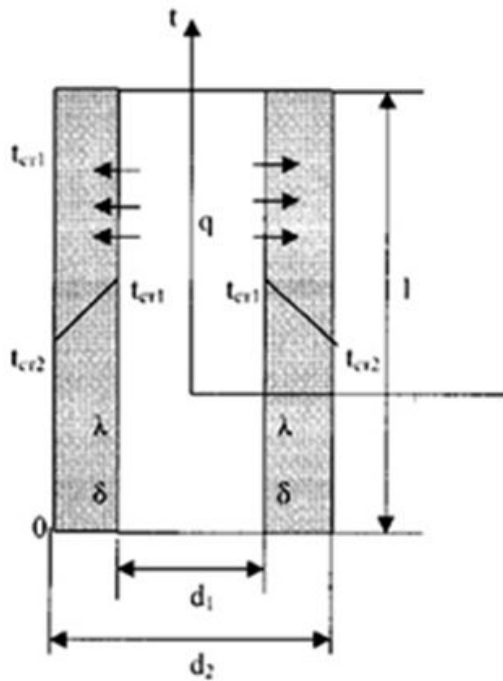


Рис. 4

Рассмотрим однородный однослойный цилиндр длиной  $l$ , внутренним диаметром  $d_1$  и внешним диаметром  $d_2$  (Рис. 4).

Температуры поверхностей стенки –  $t_{ct1}$  и  $t_{ct2}$ .

Уравнение Фурье в цилиндрических координатах:

$$Q = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (11)$$

После интегрирования получим

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot \Delta t / \ln(d_2/d_1), \quad (12)$$

де:  $\Delta t = t_{ct1} - t_{ct2}$  – температурный напор;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки.

Для многослойной цилиндрической стенки ( $n$  слоев) получим

$$Q = \frac{2\pi L(t_{ct1} - t_{ct2})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)} \quad (13)$$

# Дифференциальное уравнение теплопроводности

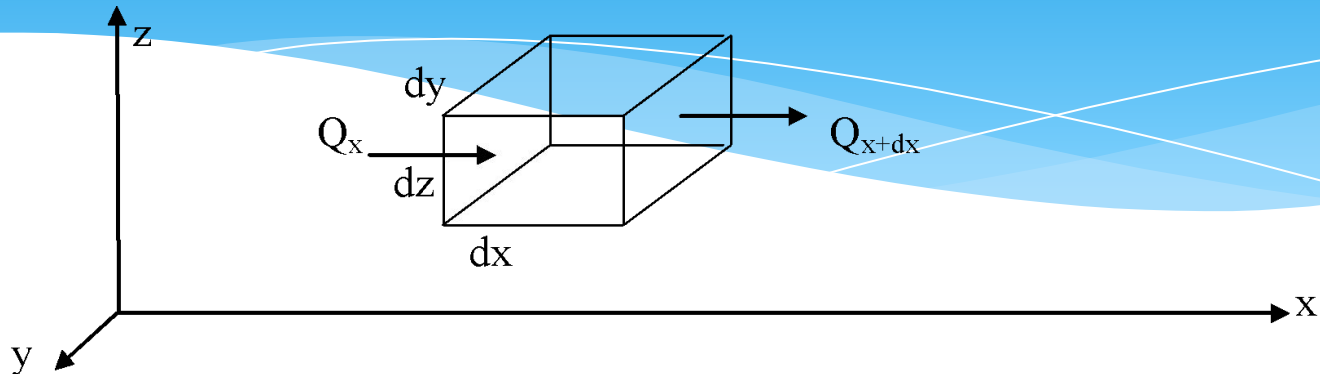


Рис. 5

Тепловой поток вдоль оси  $x$  на входе в левую грань параллелепипеда  $Q_x$  по закону Фурье

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot d\tau$$

На выходе правой грани тепловой поток получит изменение вдоль длины грани  $dx$

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot d\tau + \left[ -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \right]$$

Тогда изменение количества тепла вдоль оси  $x$  составит

$$dQ_x = \left[ \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \right].$$

# Дифференциальное уравнение теплопроводности

Аналогично получим изменение количества тепла вдоль оси  $y$

$$dQ_y = \left[ \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \right]$$

и изменение количества тепла вдоль оси  $z$

$$dQ_z = \left[ \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau \right]$$

Полное изменение количества тепла в параллелепипеде за время  $d\tau$ , с учетом, что  $dV = dx \cdot dy \cdot dz$  составит

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dV \cdot d\tau$$

Выражение в скобках представляет собой квадрат оператора Гамильтона  $\nabla^2 t$ . По закону сохранения энергии изменение количества тепла равно изменению энтальпии параллелепипеда, тогда имеем

$$dQ = \lambda dV \cdot \Delta^2 t \cdot d\tau = c_p \rho \cdot dV \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$$

Тогда сокращая на  $dV \cdot d\tau$ , получим

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

С учетом оператора Гамильтона и наличия дополнительного источника тепла  $q_r$ , с введением коэффициента температуропроводности  $a = \lambda / c_p \rho$ , получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t + \frac{q_r}{c_p \cdot \rho}.$$

# Конвективный теплообмен

**Конвективным теплообменом** называется одновременный перенос теплоты конвекцией (поток среды) и теплопроводностью.

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости (или газа) и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективно-теплообмена называют **конвективной теплоотдачей** или просто теплоотдачей.

Основными факторами, влияющими на процесс теплоотдачи являются следующие:

1). Природа возникновения движения жидкости вдоль поверхности стенки.

Самопроизвольное движение жидкости (газа) в поле тяжести, обусловленное разностью плотностей её горячих и холодных слоев, называют свободным движением (**естественная конвекция**). Движение, создаваемое вследствие разности давлений, которые создаются насосом, вентилятором и другими устройствами, называется вынужденным (**вынужденная конвекция**).

2). Режим движения жидкости. Упорядоченное, слоистое, спокойное, без пульсаций движение называется **ламинарным**. Беспорядочное, хаотическое, вихревое движение называется **турбулентным**. Оно интенсифицирует конвекцию.

3). Физические свойства жидкостей и газов.

Большое влияние на конвективный теплообмен оказывают следующие физические параметры: коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), удельная теплоемкость ( $c$ ), плотность ( $\rho$ ), коэффициент температуропроводности ( $a = \lambda / c_p \cdot \rho$ ), коэффициент динамической вязкости ( $\mu$ ) или кинематической вязкости ( $\nu$ ), температурный коэффициент объемного расширения ( $\beta = 1/T$ ).

4). Форма (плоская, цилиндрическая), размеры и положение поверхности (горизонтальная, вертикальная).

# Уравнение Ньютона-Рихмана

**Уравнение Ньютона-Рихмана** показывает, что количество теплоты, передаваемая конвективным теплообменом прямо пропорционально разности температур поверхности тела ( $t_{\text{ст}}$ ) и окружающей среды ( $t_{\text{с}}$ ) и поверхности теплообмена  $F$ :

$$Q = \alpha \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) \cdot F, \quad (14)$$

или

$$q = \alpha \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}), \quad (15)$$

где:  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи [ $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ], характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Факторы, которые влияют на процесс конвективного теплообмена, обычно включают в этот коэффициент теплоотдачи. Тогда коэффициент теплоотдачи является функцией всех этих выше перечисленных параметров. Следовательно, коэффициент теплоотдачи величина сложная и для её определения невозможно дать общую формулу. Поэтому для его определения применяют экспериментальный метод исследования на основе теории подобия.

**Теория подобия** – это наука о подобных явлениях. Подобными явлениями называются такие физические явления, которые имеют одну физическую природу, развиваются под действием одинаковых сил и описываются одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями и краевыми условиями.

Обязательным условием подобия физических явлений должно быть **геометрическое подобие** систем, где эти явления протекают. Два физических явления будут подобны лишь в том случае, если будут подобны все величины, которые характеризуют их.

Для всех подобных систем существуют безразмерные комплексы величин, которые называются **критериями подобия**.

# Критериальные уравнения конвективного теплообмена

Основные положения теории подобия формулируют в виде 3-х теорем подобия.

**1 теорема:** Подобные явления имеют одинаковые критерии подобия.

**2 теорема:** Любая зависимость между переменными, характеризующая какие-либо явления, может быть представлена, в форме зависимости между критериями подобия, составленными из этих переменных, которая будет называться критериальным уравнением.

**3 теорема:** Два явления подобны, если они имеют подобные условия однозначности и численно одинаковые определяющие критерии подобия.

Используя теорию подобия из системы дифференциальных уравнений энергии, импульса, неразрывности и теплопроводности можно получить уравнение для конвективного теплообмена в следующей критериальной форме [1-4]:

$$Nu = f(Re; Gr; Pr),$$

где:  $Nu = \alpha \cdot l / \lambda$  - критерий Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи), характеризует теплообмен между поверхностью стенки и средой (жидкостью или газом);

$Re = w \cdot l / \nu$  - критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет характер течения жидкости (газа);

$Gr = (\beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \Delta t) / \nu^2$  - критерий Грасгофа, характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости (газе) вследствие разности плотностей при естественной конвекции;

$Pr = \nu / a = (\mu \cdot c_p) / \lambda$  - критерий Прандтля, характеризует физические свойства жидкости (газа);

$l$  – определяющий размер (длина, высота, диаметр).

В критериальных уравнениях сокращается число переменных параметров.

# Расчетные формулы конвективного теплообмена

## 1. Свободная конвекция в неограниченном пространстве.

а). Горизонтальная труба диаметром  $d$  при  $10^3 < (Gr \cdot Pr) < 10^8$ .

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (16)$$

б). Вертикальная труба и пластина:

1). ламинарное течение -  $10^3 < (Gr \cdot Pr) < 10^9$ :

$$Nu = 0,75 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (17)$$

2). турбулентное течение -  $(Gr \cdot Pr) > 10^9$ :

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (18)$$

Здесь значения  $Gr$  и  $Pr$  берутся при температуре жидкости (газа), а  $Pr_{ct}$  при температуре поверхности стенки.

Для воздуха  $Pr / Pr_{ct} = 1$  и формулы (16-18) упрощаются.



# Расчетные формулы конвективного теплообмена

## 2. Вынужденная конвекция. Течение в гладких трубах круглого сечения.

Режим течения определяется по величине критерия Re.

а) ламинарное течение –  $Re < 2100$

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,33} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot \epsilon_1 \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (19)$$

где  $\epsilon_1$  - коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы и зависит от отношения длины трубы к его диаметру ( $l/d$ ). Значения этого коэффициента представлена ниже в таблице 1.

**Таблица 1.** Значение  $\epsilon_1$  при ламинарном режиме.

|              |     |     |      |      |      |      |      |      |     |
|--------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|
| $l/d$        | 1   | 2   | 5    | 10   | 15   | 20   | 30   | 40   | 50  |
| $\epsilon_1$ | 1,9 | 1,7 | 1,44 | 1,28 | 1,18 | 1,13 | 1,05 | 1,02 | 1,0 |

б) переходной режим –  $2100 < Re < 10^4$

$$Nu = K_0 \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr/Pr_{ct})^{0,25} \cdot \epsilon_1. \quad (20)$$

Коэффициент  $K_0$  зависит от критерия Рейнольдса Re и представлена в таблице 2.

**Таблица 2.** Значение коэффициента  $K_0$ .

|                 |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| $Re \cdot 10^4$ | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 3   | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   |
| $K_0$           | 1,9 | 2,2 | 3,3 | 3,8 | 4,4 | 6,0 | 10,3 | 15,5 | 19,5 | 27,0 | 33,3 |

# Теплопередача через плоскую стенку

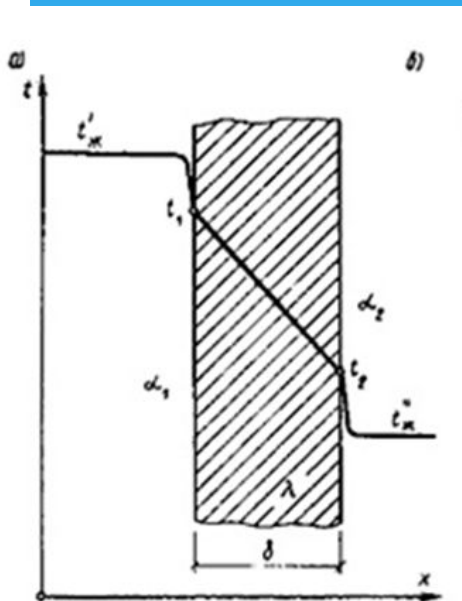


Рис. 6.

где  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности стенки к холодной среде с температурой  $t''_{ж}$ .

Решая эти три уравнения совместно получаем:

$$Q = (t'_{ж} - t''_{ж}) \cdot F \cdot K, \quad (24)$$

где  $K = 1 / (1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2)$  – коэффициент теплопередачи, (25)

$R = 1/K = 1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2$  – полное термическое сопротивление теплопередачи через однослойную плоскую стенку.

Теплоотдача от горячей среды  $t'_{ж}$ , к холодной среде  $t''_{ж}$ .

Количество теплоты, переданной от горячей среды к стенке по уравнению Ньютона-Рихмана имеет вид:

$$Q = \alpha_1 \cdot (t'_{ж} - t_1) \cdot F, \quad (21)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от горячей среды с температурой  $t'_{ж}$  к поверхности стенки с температурой  $t_1$ ;  $F$  – расчетная поверхность плоской стенки.

Тепловой поток через стенку определяется по уравнению:

$$Q = \lambda/\delta \cdot (t_1 - t_2) \cdot F. \quad (22)$$

Тепловой поток от второй поверхности стенки к холодной среде определяется по формуле:  $Q = \alpha_2 \cdot (t_2 - t''_{ж}) \cdot F, \quad (23)$

# Теплопередача через цилиндрическую стенку

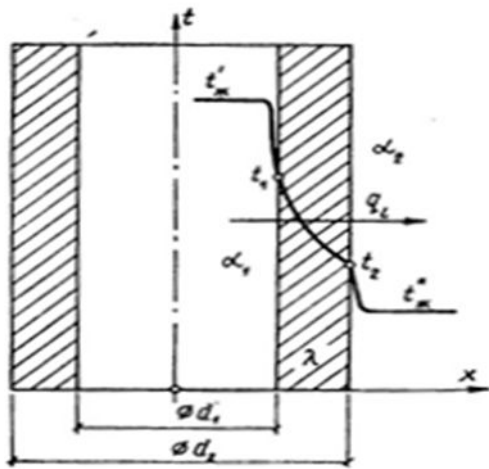


Рис. 7.

Принцип расчета теплового потока через цилиндрическую стенку аналогичен плоской стенке.

Количество теплоты, переданной от горячей среды к внутренней стенке трубы по уравнению Ньютона-Рихмана имеет вид:

$$Q = \alpha_1 \pi d_1 \cdot l \cdot (t'_{\text{ж}} - t_1), \quad (26)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от горячей среды с температурой  $t'_{\text{ж}}$  к поверхности стенки с температурой  $t_1$ ;

тепловой поток, переданный через стенку трубы определяется по уравнению:  $Q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L \cdot (t_1 - t_2) / \ln(d_2/d_1)$ , (27)

Тепловой поток от второй поверхности стенки трубы к холодной

среде определяется по формуле:  $Q = \alpha_2 \pi d_2 \cdot l \cdot (t_2 - t''_{\text{ж}})$ , (28)

где  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от второй поверхности стенки к холодной среде с температурой  $t''_{\text{ж}}$ .

Решая эти три уравнения совместно получаем:

$$Q = \pi l \cdot (t'_{\text{ж}} - t''_{\text{ж}}) \cdot K, \quad (29)$$

Где:  $K = 1 / [1/(\alpha_1 d_1) + 1/(2\lambda \ln(d_2/d_1)) + 1/(\alpha_2 d_2)]$  (30) - коэффициент теплопередачи.

# Общие сведения о тепловом излучении

Лучеиспускание свойственно всем телам, и каждое из них излучает и поглощает энергию непрерывно, если температура его не равна  $0^{\circ}\text{K}$ . При одинаковых или различных температурах между телами, расположенными как угодно в пространстве, существует непрерывный лучистый теплообмен.

Природа всех лучей одинакова. Они представляют собой распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны. Источником теплового излучения является внутренняя энергия нагретого тела. Количество лучистой энергии в основном зависит от физических свойств и температуры излучающего тела. Электромагнитные волны различаются между собой длиной волны

В зависимости от длины волны  $\lambda$  лучи обладают различными свойствами. Наименьшей длиной волны обладают космические лучи  $\lambda = (0,1 - 10)\text{\AA}$  (где  $\text{\AA}$  — ангстрем, единица длины,  $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ м}$ ). Гамма-лучи, испускаемые радиоактивными веществами, имеют длину волны до  $10\text{\AA}$ ; лучи Рентгена —  $\lambda = (10-200)\text{\AA}$ ; ультрафиолетовые лучи —  $\lambda = (200\text{\AA} - 0,4\text{ мк})$  ( $1\text{ мк} = 0,001\text{ мм}$ ), световые лучи —  $\lambda = (0,4-0,8)\text{ мк}$ , инфракрасные или тепловые лучи —  $\lambda = (0,8 - 400)\text{ мк}$ , радио или электромагнитные лучи —  $\lambda > 400\text{ мк}$ . Из всех лучей наибольший интерес для теплопередачи представляют тепловые лучи с  $\lambda = (0,8 - 40)\text{ мк}$ .

# Спектр радиации

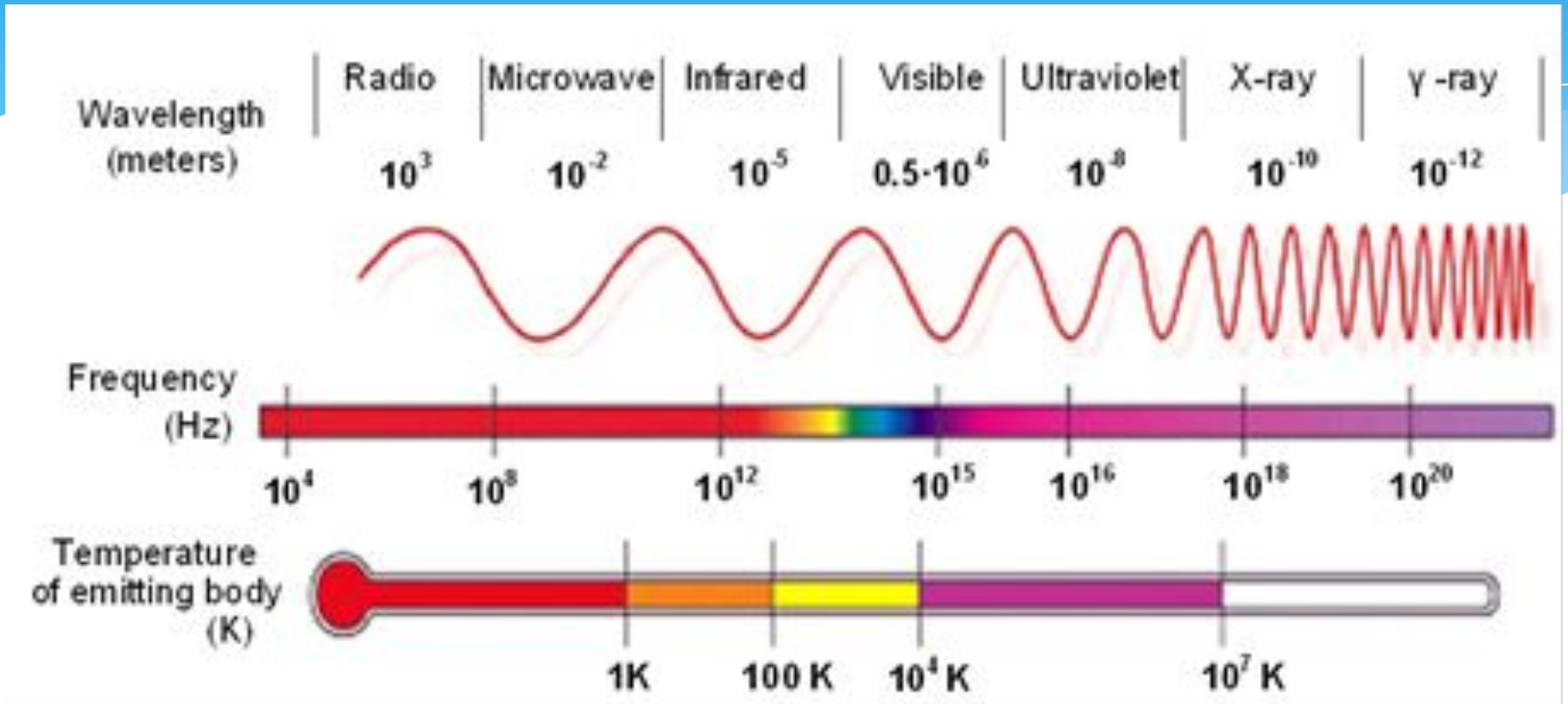
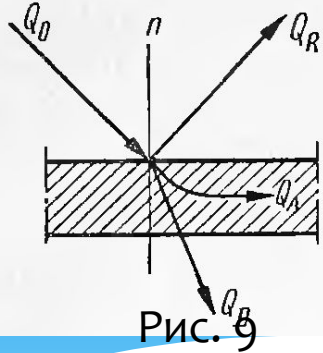


Рис. 8. Спектр радиации

Соотношение между частотой излучения  $f$  и длиной волны  $\lambda$  определяется соотношением [6]:  
$$f = c / \lambda, \quad (30)$$
где  $c = 2,998 \cdot 10^8$  – скорость света в вакууме (м/с).



# Отражение, поглощение проникновение лучей

Каждое тело способно не только излучать, но и отражать, поглощать и пропускать через себя падающие лучи от другого тела. Если обозначить общее количество лучистой энергии, падающей на тело, через  $Q$ , то часть энергии, равная  $A$ , поглотится телом, часть, равная  $R$ , отразится, а часть, равная  $D$ , пройдет сквозь тело. Отсюда

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D, \quad (30)$$

или

$$A + R + D = 1. \quad (31)$$

Величину  $A$  называют **коэффициентом поглощения**. Он представляет собой отношение поглощенной лучистой энергии ко всей лучистой энергии, падающей на тело. Величину  $R$  называют **коэффициентом отражения**.  $R$  есть отношение отраженной лучистой энергии ко всей падающей. Величину  $D$  называют **коэффициентом проницаемости**.  $D$  есть отношение прошедшей сквозь тело лучистой энергии ко всей лучистой энергии, падающей на тело. Для большинства твердых тел, практически не пропускающих сквозь себя лучистую энергию,  $A + R = 1$ . Если поверхность поглощает все падающие на нее лучи, т. е.  $A = 1$ ,  $R = 0$  и  $D = 0$ , то такую поверхность называют абсолютно черной. Если поверхность отражает полностью все падающие на нее лучи, то такую поверхность называют абсолютно белой. При этом  $R = 1$ ,  $A = 0$ ,  $D = 0$ . Если тело абсолютно проницаемо для тепловых лучей, то  $D = 1$ ,  $R = 0$  и  $A = 0$ .

# Основные законы теплового излучения

Планк установил закон изменения интенсивности излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры и длины волны:

$$E_{b,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (32)$$

где  $e$  - основание натуральных логарифмов;  $C_1 = 3,741 \cdot 10^{-16}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·град;  $\lambda$  - длина волны, м;  $T$  - температура излучающего тела, К.

Из рис.10 видно, что для любой температуры интенсивность излучения  $E$  возрастает от нуля (при  $\lambda=0$ ) до своего наибольшего значения, а затем убывает до нуля (при  $\lambda = \infty$ ). При повышении температуры интенсивность излучения для каждой длины волны возрастает.

**Закон смещения Вина.** Из рис.10 следует, что максимумы кривых (пунктир) с повышением температуры смещаются в сторону более коротких волн.

$$\lambda_{\max} = 2,898 \cdot 10^{-3} / T. \quad (33)$$

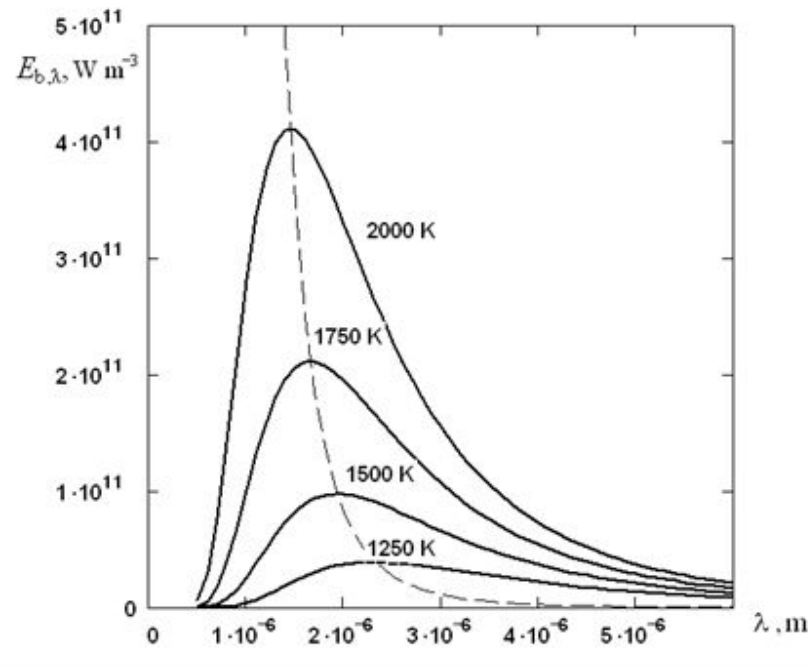


Рис.10

## Закон Стефана-Больцмана

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b,\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

где  $\sigma = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) - коэффициент излучения абсолютно черного тела

# ЛИТЕРАТУРА

## Основная литература:

1. Тихомиров, К.В. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция: учеб. для вузов/ К.В. Тихомиров, Э.С. Сергеенко.– М.: Стройиздат, 2007.– 480 с.
2. Кононова, М.С., Воробьева Ю.А. Теплогазоснабжение с основами теплотехники. Воронеж 2014, - 60 с.
3. Теплогазоснабжение с основами теплотехники [Электронный ресурс]: лабораторный практикум/ — Электрон. текстовые данные.— Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013.— 94 с.
4. Теплогазоснабжение многоквартирного жилого дома [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие/ Д.М. Чудинов [и др.].— Электрон. текстовые данные.— Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2014.— 89 с.



# ЛИТЕРАТУРА

## Дополнительная литература:

1. Бирюзова Е.А. Теплоснабжение. Часть 1. Горячее водоснабжение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Бирюзова Е.А.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012.— 192 с
2. Подпоринов Б.Ф. Теплоснабжение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Подпоринов Б.Ф.— Электрон. текстовые данные.— Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2011.— 267 с.
3. Новопашина Н.А. Газопотребление и газораспределение. Часть 2. Надежность систем газоснабжения [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов/ Новопашина Н.А., Филатова Е.Б.— Электрон. текстовые данные.— Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2011.— 152 с.
4. Шарапов В.И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения [Электронный ресурс]: монография/ Шарапов В.И., Ротов П.В.— Электрон. текстовые данные.— М.: Новости теплоснабжения, 2007.— 165 с.
5. Ефремов Г.И. Моделирование химико-технологических процессов. Учебник, М., ИНФРА-М, 2016.—255 с.
6. Efremov G. Modern Drying Technology, (монография) v.5 Process Intensification. Ch. 10 Infrared Drying (Инфракрасная сушка), Wiley-VCH GmbH, Germany, 2013, 70 p.