



МОСКОВСКИЙ
ФИНАНСОВО-
ЮРИДИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Теплогазоснабжение с основами теплотехники

№ 1. Основы теплотехники

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

Контакты: 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

№	Наименование темы
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; τ - 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 Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn , когда он стремится к нулю:

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

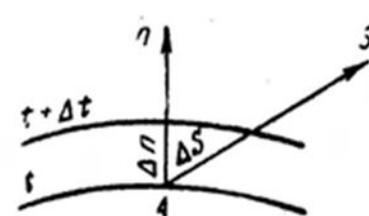


Рис.1

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 λ – коэффициент теплопроводности, [Вт/(м·К)].

Коэффициент теплопроводности λ 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

$$q = \lambda \cdot \Delta t / \Delta x \quad (7)$$

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

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

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

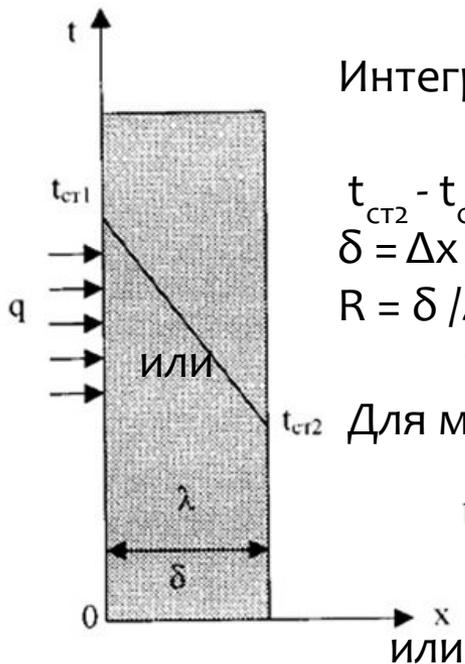


Рис. 2

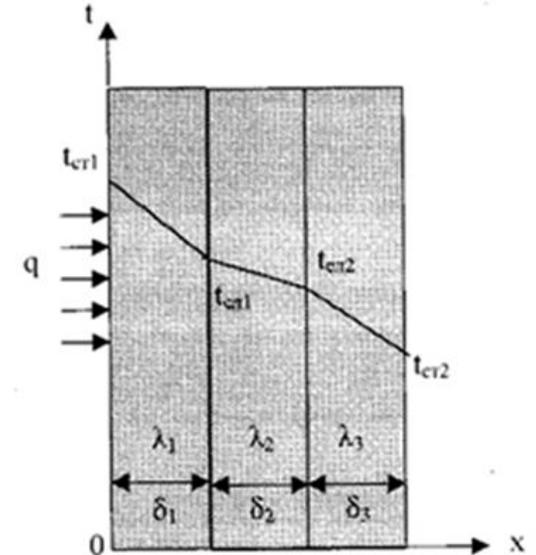


Рис. 3

Теплопроводность через цилиндрическую стенку

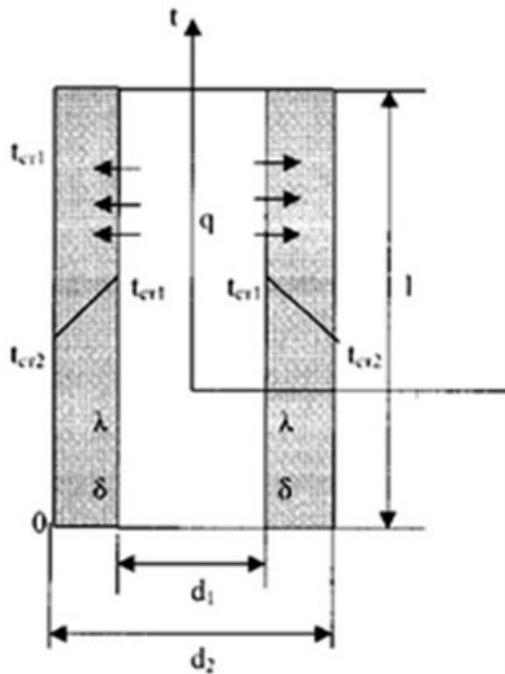


Рис. 4

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;

λ – 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

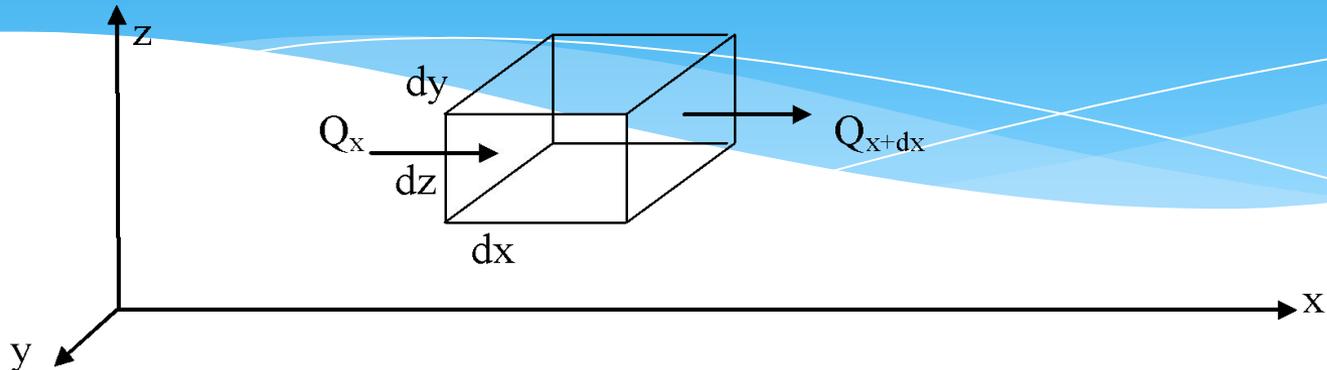


Рис. 5

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 (λ), удельная теплоемкость (c), плотность (ρ), коэффициент температуропроводности ($a = \lambda / c_p \cdot \rho$), коэффициент динамической вязкости (μ) или кинематической вязкости (ν), 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: α - 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 ϵ_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 ϵ_1 при ламинарном режиме.

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ϵ_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

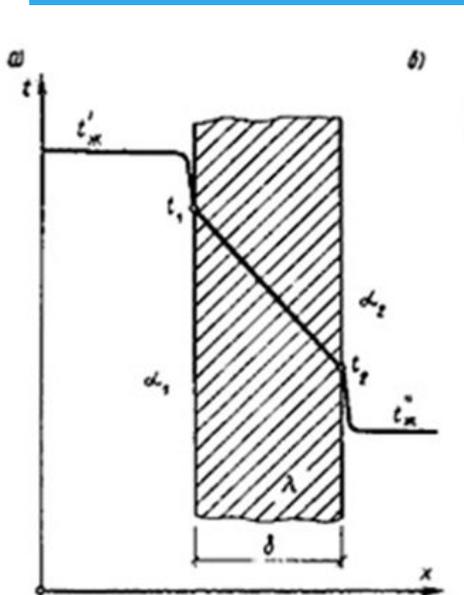


Рис. 6.

где α_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 α_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

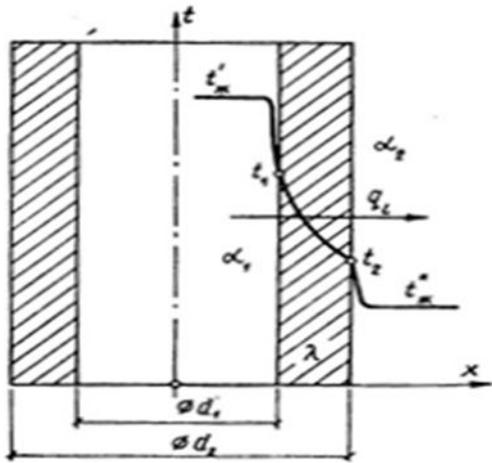


Рис. 7.

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:

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

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячей среды с температурой t_1 к поверхности стенки с температурой $t'_{ж}$;

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: $Q = \alpha_2 \pi d_2 \cdot l \cdot (t_1 - t''_{ж})$, (28)

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от второй поверхности стенки к холодной среде с температурой $t''_{ж}$.

Решая эти три уравнения совместно получаем:

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

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°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 λ лучи обладают различными свойствами. Наименьшей длиной волны обладают космические лучи $\lambda = (0,1 - 10)\text{\AA}$ (где \AA — ангстрем, единица длины, $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ м}$). Гамма-лучи, испускаемые радиоактивными веществами, имеют длину волны до 10\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

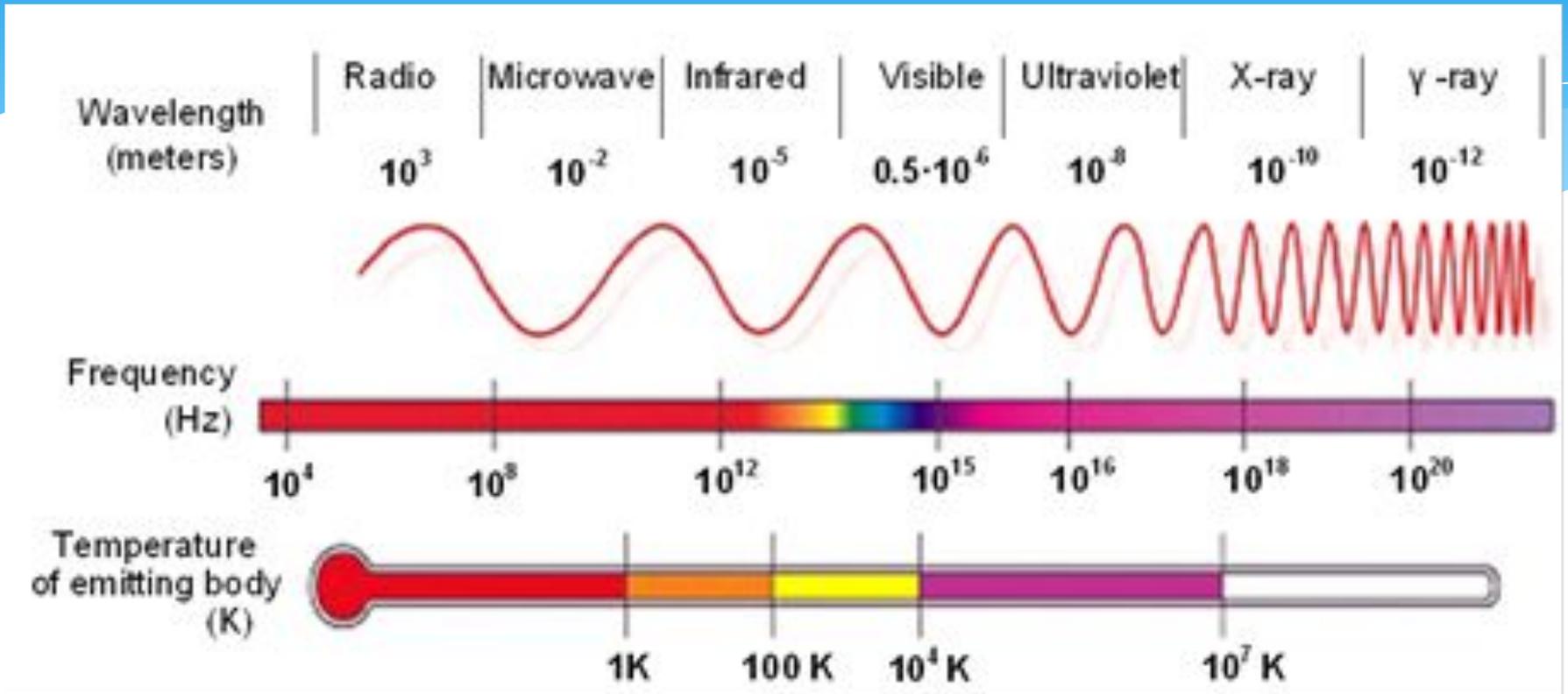
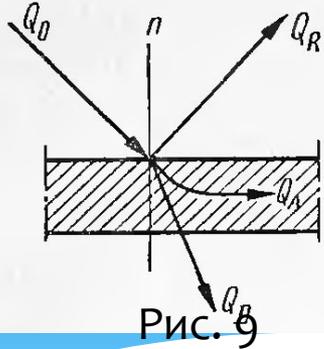


Рис. 8. Спектр радиации

Соотношение между частотой излучения f и длиной волны λ определяется соотношением [6]: $f = c / \lambda$, (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/м²; $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$ м·град; λ - 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.

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

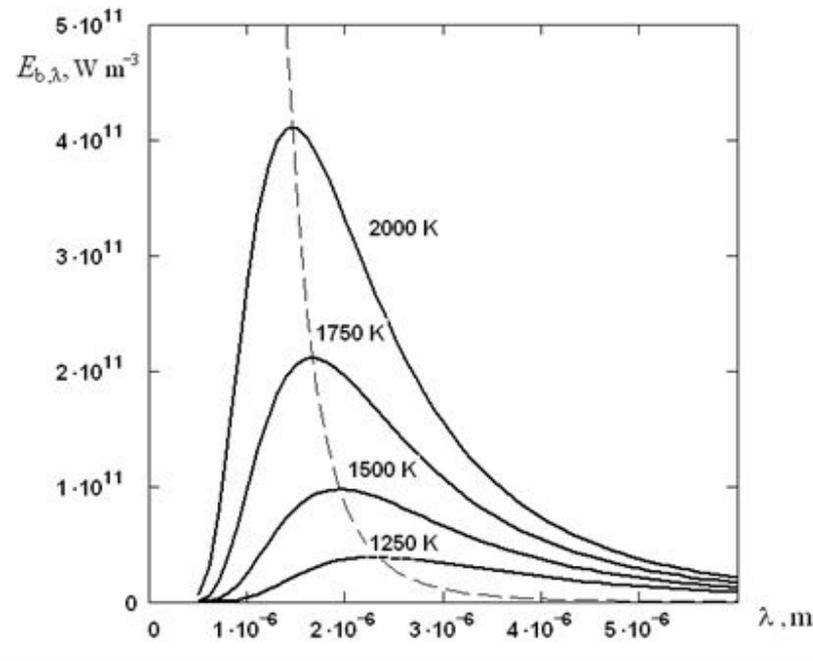


Рис.10

Закон Стефана-Больцмана

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

где $\sigma = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) - 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.