

# Теплотехника

## Техническая термодинамика и теплопередача

Овсянников М.К. И.И., Орлова  
Е.Г., Костылев

# Часть 2

# ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

ФГБОУ ГУМРФ

# Оглавление

**ВВЕДЕНИЕ**

**РАЗДЕЛ II. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

**Глава 11. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ**

**Глава 12. КОНВЕКТИВНЫЙ  
ТЕПЛООБМЕН**

**Глава 13. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

**Глава 14. ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН**

**Глава 15. ОСНОВЫ РАСЧЕТА  
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

**Приложения**

# Глава 11. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

11.1. Температурное поле и температурный градиент

11.2. Тепловой поток. Основной закон теплопроводности

11.3. Коэффициент теплопроводности

11.4. Дифференциальное уравнение теплопроводности

11.5. Условия однозначности (краевые условия) задач теплопроводности

11.6. Способы задания граничных условий теплообмена

11.7. Стационарная теплопроводность через однослойную плоскую стенку.

11.8. Стационарная теплопроводность через многослойную плоскую стенку

11.9. Теплопроводность через цилиндрическую стенку

11.10. Сравнение теплопроводности цилиндрической и плоской стенок

11.13. Теплопроводность через многослойную цилиндрическую стенку

11.14. Теплопроводность в стержне постоянного поперечного сечения

11.15. Нестационарная теплопроводность. Понятие о регулярном режиме

*Контрольные вопросы и задания к главе 11*

# Глава 12. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

12.1. Понятия и определения

12.2 Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена

12.3. Основы теории подобия

12.4. Числа гидромеханического подобия

12.5. Числа теплового подобия

12.6. Критериальные уравнения конвективного теплообмена

12.7. Теплообмен в свободном потоке жидкости (естественная конвекция)

12.8. Теплообмен в вынужденном потоке жидкости (вынужденная конвекция)

12.8.1. Режимы движения вязкой жидкости

12.8.2. Понятие пограничного слоя

- 12.8.3. Осреднение параметров потока
- 12.8.4. Теплоотдача в каналах при ламинарном режиме движения жидкости
- 12.8.5. Теплоотдача в каналах при турбулентном режиме движения жидкости
- 12.8.6. Теплоотдача при поперечном омывании гладких труб
- 12.8.7. Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб
- 12.8.8. Теплоотдача при движении жидкости вдоль плоской стенки
- 12.9. Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния

*Контрольные вопросы и задания к главе 12*

# Глава 13. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

13.1. Теплопередача от среды к среде через многослойную плоскую стенку

13.2. Эквивалентная стенка

13.3. Теплопередача через цилиндрическую стенку. Термическое сопротивление теплопередаче

13.4. Понятие о критической толщине изоляции

*Контрольные вопросы и задания к главе 13*



# Глава 14. ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

14.1. Определения

14.2. Основные законы теплового излучения

14.3. Излучение газов

14.4. Излучение между твердыми телами.

*Контрольные вопросы и задания к главе 14*

# Глава 15. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

15.1. Определения

15.2. Основы расчета рекуперативного  
теплообменника

15.3. Теплообменники с органическим  
теплоносителем

15.4. Особенности расчета теплообмена в  
установках с термомаслом

*Контрольные вопросы и задания к главе 15*

# Приложения

1. Задачи. Решения
2. Таблицы теплофизических свойств жидкостей, газов и твердых тел

# Условные обозначения

## Раздел II. Теплопередача

$\alpha$ , Вт/м<sup>2</sup>·К — коэффициенты теплоотдачи;

$k$ , Вт/м<sup>2</sup>·К — коэффициент теплопередачи;

$k_p$ , Вт/м·К — погонный коэффициент теплопередачи;

$G$ , кг/с — массовый расход;

$G_v$ , м<sup>3</sup>/с — объемный расход;

$W$ , (м/с) — скорость;

$Re = \frac{w \cdot \lambda}{\gamma}$  число Рейнольдса;

$Nu = \frac{\alpha}{\lambda \cdot \lambda}$  число Нуссельта;

# Условные обозначения

$Pr$  — число Прандтля при средней температуре потока;

$Pr_w$  — число Прандтля при температуре стенки;

$Gr = \frac{\beta g \Delta t}{\nu^2}$  число Грасгофа;

$Fr$  — число Фруда;

$Eu$  — число Эйлера;

$Pe$  — число Пекле;

$Fo$  — число Фурье;

$c_p$ , кДж/кг·К — удельная изобарная теплоемкость;

# Условные обозначения

$\rho$ , кг/м<sup>3</sup> — плотность теплоносителя при средней температуре;

$\lambda$ , Вт/м·К — коэффициент теплопроводности;

$\lambda_w$ , Вт/м·К — коэффициент теплопроводности материала стенки;

$\nu$ , м/с<sup>2</sup> — кинематический коэффициент вязкости;

$l$ , м — характерный размер;

$Q$ , кВт — тепловая мощность;

$Q_o$ , Дж — абсолютное количество тепла;

$q$ , Вт/м<sup>2</sup> — плотность теплового потока;

$\Delta t_l$ , °С — среднелогарифмический перепад температур;

$t'_{гор}$ , °С — температура горячей среды на входе в теплообменник;

$t''_{гор}$ , °С — температура горячей среды на выходе из теплообменника;

# Условные обозначения

$t'_{\text{ХОЛ}}, ^\circ\text{C}$  — температура холодной среды на входе в теплообменник;

$t''_{\text{ХОЛ}}, ^\circ\text{C}$  — температура холодной среды на выходе из теплообменника;

$F, \text{м}^2$  — площадь теплообменной поверхности;

$S, \text{м}^2$  — площадь поперечного сечения потока;

$d_{\text{ЭКВ}}, \text{м}$  — эквивалентный диаметр сечения;

$\delta, \text{м}$  — толщина стенки;

$\delta_{\text{П.С.}}, \text{м}$  — толщина пограничного слоя;

$E, \text{Вт}/\text{м}^2$  — излучательная способность тела;

$I_\lambda, \text{Вт}/\text{м}^3$  — интенсивность излучения;

$E_s, \text{Вт}/\text{м}^2$  — интегральная плотность излучения абсолютно черного тела в вакуум.

Первая часть курса «Техническая термодинамика» содержит общие сведения о параметрах, характеристиках и теплофизических свойствах рабочих сред судовых энергетических установок (в том числе газовых смесей и двухфазных смесей) и способах их определения; изложение основных законов технической термодинамики; сведения о термодинамических циклах тепловых двигателей и холодильных установок и оценке их эффективности:



**Глава 1.  
ГАЗ КАК РАБОЧЕЕ ТЕЛО.  
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
СОСТОЯНИЯ.  
УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ**

Теплообмен можно определить как *энергетическое взаимодействие элементов вещества с различной температурой.*

Научная дисциплина, изучающая процессы теплообмена, называется *теплопередачей.*

Есть три различающихся по физической природе вида теплообмена:

теплопроводность, конвекция и излучение (радиация). Поэтому и курс теплопередачи разделен на три соответствующих раздела.

# Глава 11.

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

*Теплопроводность* — перенос теплоты в сплошной среде — осуществляется взаимодействием структурных частиц вещества: молекул, атомов и электронов. Это единственный вид передачи тепла через твердое тело. Механизм теплопроводности зависит от физических свойств теплопередающей среды.

# 11.1. Температурное поле и температурный градиент

Совокупность значений температуры во всех точках тела называется его *температурным полем*:  $t = t(x, y, z, \tau)$ .

Температурные поля могут быть стационарными (не меняющимися во времени, при этом выполняется

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

и нестационарными (при разогреве или охлаждении тела).

# Температурное поле и температурный градиент

- *Точки тела с одинаковой температурой образуют изотермическую поверхность. При пересечении нескольких таких поверхностей плоскостью появляется семейство изотерм.*
- Изотермы и изотермические поверхности различного уровня (с различными  $t$ ) не пересекаются и внутри однородного тела непрерывны, не имеют разрывов.

# Температурный градиент

- Интенсивность изменения температуры по нормали к изотермической поверхности называется *градиентом температуры*, К/м:

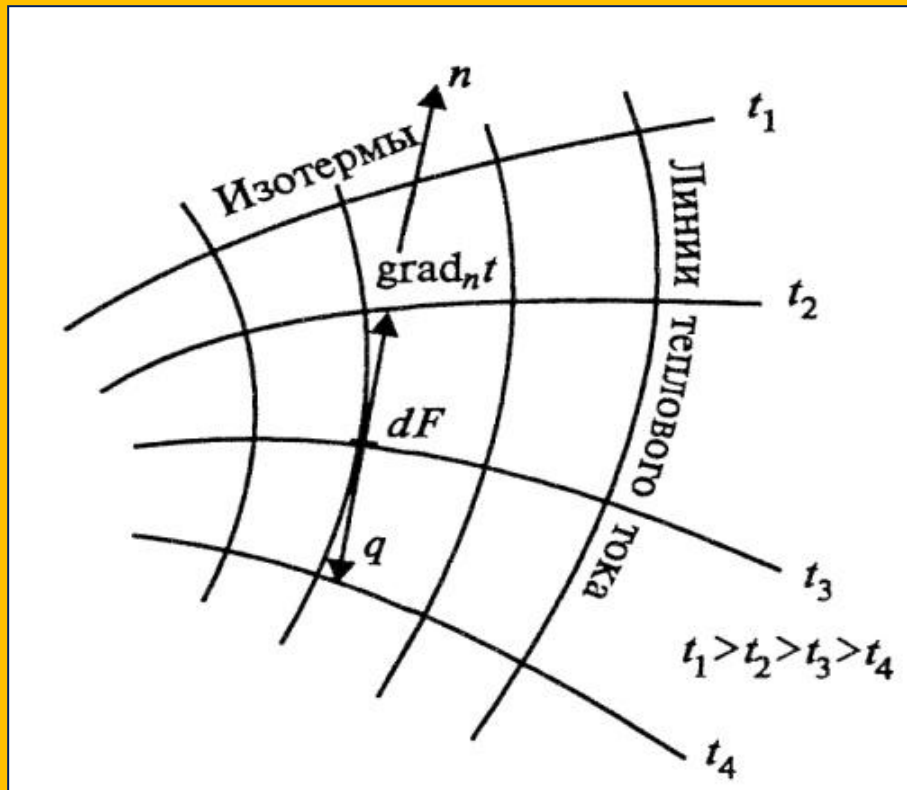
$$\text{grad}_n t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{dt}{dn}$$

- Градиент температуры является вектором, всегда направлен в сторону возрастания температуры и может быть разложен по координатным осям:

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

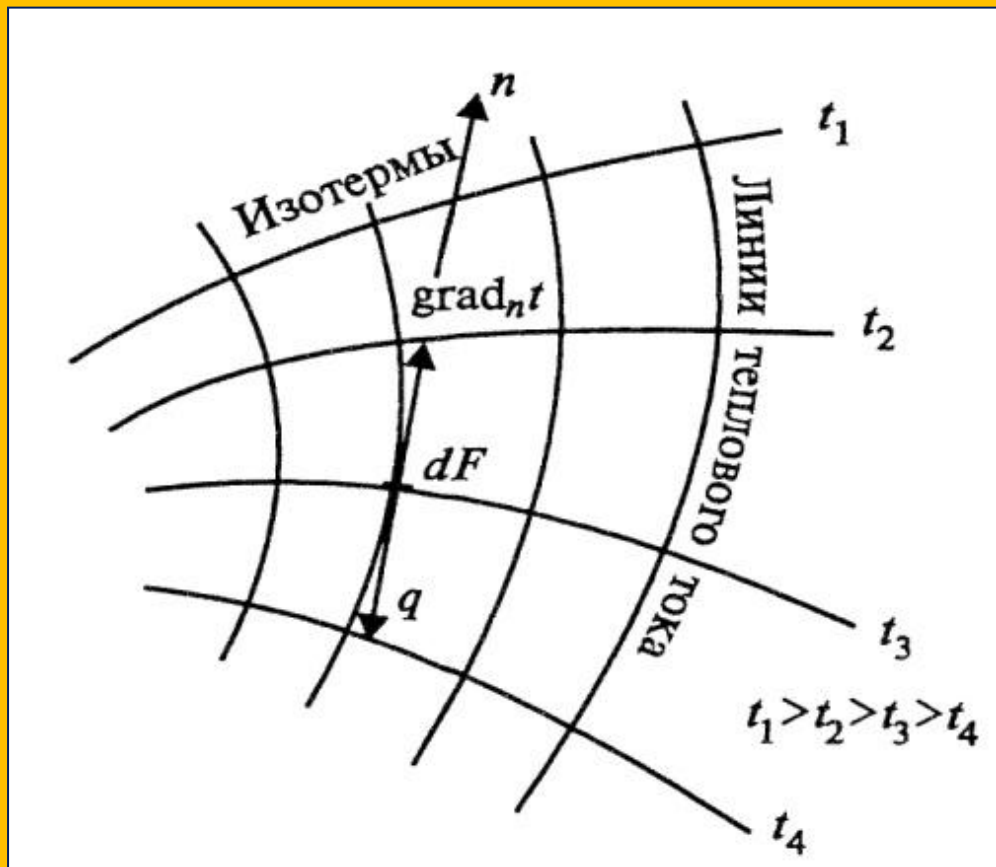
где  $\overset{\square}{i}$ ,  $\overset{\square}{j}$ ,  $\overset{\square}{k}$  координатные орты.

# 11.2. Тепловой поток. Основной закон теплопроводности (закон Фурье)



Количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади, называется *плотностью теплового потока*  $q$ ,  $\text{Дж}/(\text{с м}^2) = \text{Вт}/\text{м}^2$

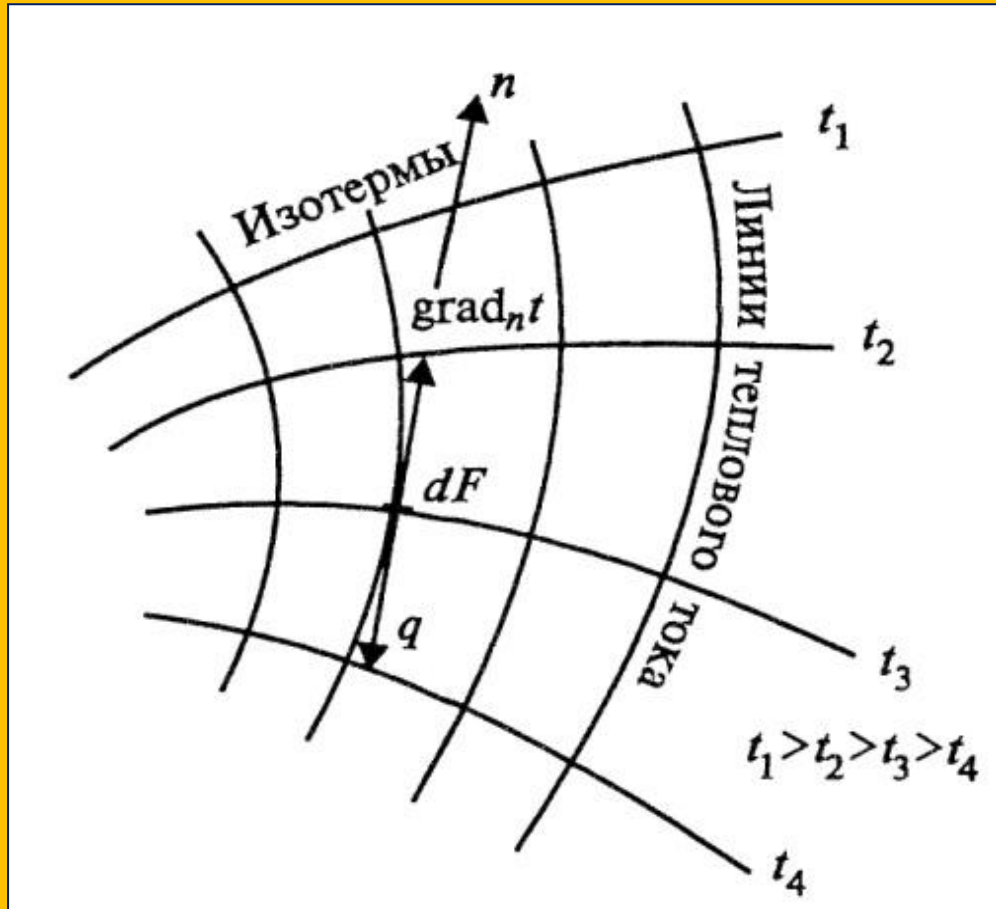
# Тепловой поток. Основной закон теплопроводности (закон Фурье)



Величина вектора плотности теплового потока, перпендикулярного элементарной площадке  $dF$ , зависит только от физических свойств тела и температурного градиента.



# Закон Фурье



Закон Фурье:

$$\vec{q}_n = -\lambda \text{grad}_n t = -\lambda \nabla t_n$$

или в скалярном виде:

$$q_n = -\lambda \frac{dt}{dn}$$

Линии, в каждой точке которых вектор  $\vec{q}$  направлен по касательным к ним, называются линиями теплового тока.

## 11.3. Коэффициент теплопроводности

*Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м · К) характеризует способность вещества проводить теплоту и численно равен количеству тепла, проходящему в единицу времени через единицу изотермической поверхности при единичном температурном градиенте:*

$$\lambda = \left| - \frac{q}{dt} \frac{dn}{dn} \right|$$

## Коэффициенты теплопроводности при 20 °С

Вещество	$\lambda$ , Вт/(м·К)	Вещество	$\lambda$ , Вт/(м · К)
Медь	390...410	Изоляционный кирпич	0,1...0,13
Алюминий	200...210	Вода	0,6
Углеродистая сталь	40...50	Циркуляционное масло	0,12
Серый чугун	40...50	Сухой воздух	0,026
Асбест	0,10...0,12	Водяной пар (сухой насыщенный)	0,02

## 11.4. Дифференциальное уравнение теплопроводности

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

В развернутом виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right]$$

В твердом теле, где перемещение вещества отсутствует ( $w = 0$ ):

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

# Коэффициент температуропроводности

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t \quad , \text{ где } a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

Коэффициент температуропроводности  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) представляет собой *плотность теплового потока при единичном температурном градиенте, отнесенную к плотности вещества и к его теплоемкости.*

Коэффициент  $a$  пропорционален скорости изменения температуры или скорости распространения изотермической поверхности в теле. При прочих равных условиях скорее нагреется или охладится то тело, у которого больше  $a$ .

# 11.5. Условия однозначности задач теплопроводности

В теории теплопроводности существуют четыре вида условий однозначности:

1. Геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела, в котором происходит процесс распространения теплоты.

2. Физические условия, характеризующие свойства тела (задаются  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ , закон распределения внутренних источников теплоты и др.).

3. Временные (начальные) условия, которые задаются при нестационарных режимах

4. Граничные условия (ГУ), определяющие особенности протекания теплообмена на поверхности тела.

## 11.6. Способы задания граничных условий теплообмена

В ГУ I рода задается распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени:

$$t_w = t(x_w, y_w, z_w, \tau).$$

В ГУ II рода задаются значения плотности теплового потока для каждой точки поверхности :

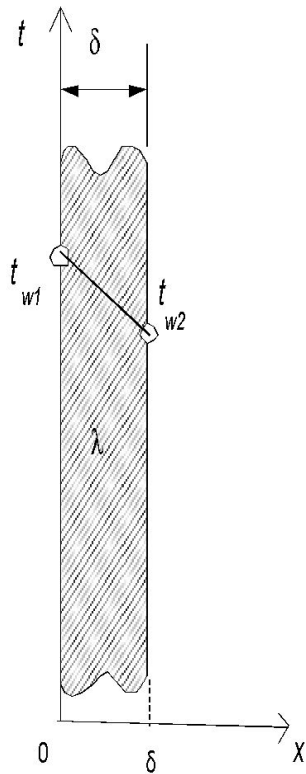
$$q_w = q(x_w, y_w, z_w, \tau).$$

Граничное условие III рода :  $q_w(\tau) = \alpha[t_c(\tau) - t_w(\tau)] = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_w$

Граничное условие IV рода определяет теплообмен в местах контакта двух тел по закону теплопроводности:

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial t_w}{\partial n} \right)_1 = \lambda_2 \left( \frac{\partial t_w}{\partial n} \right)_2$$

# 11.7. Стационарная теплопроводность через однослойную плоскую стенку



Пусть температурное поле в стенке одномерно

$$\left( \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \right)$$

и стационарно

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

заданы ГУ I рода:

$$x = 0: t = t_{w1}; \quad x = \delta: t = t_{w2}.$$



# Стационарная теплопроводность через однослойную плоскую стенку

Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности такого поля примет вид:

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

Его интегрирование дает:

$$\frac{dt}{dx} = A,$$

общее решение:  $t = Ax + B.$

Подстановка в него ГУ позволяет определить постоянные

интегрирования:  $A = -\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}, B = t_{w1}.$

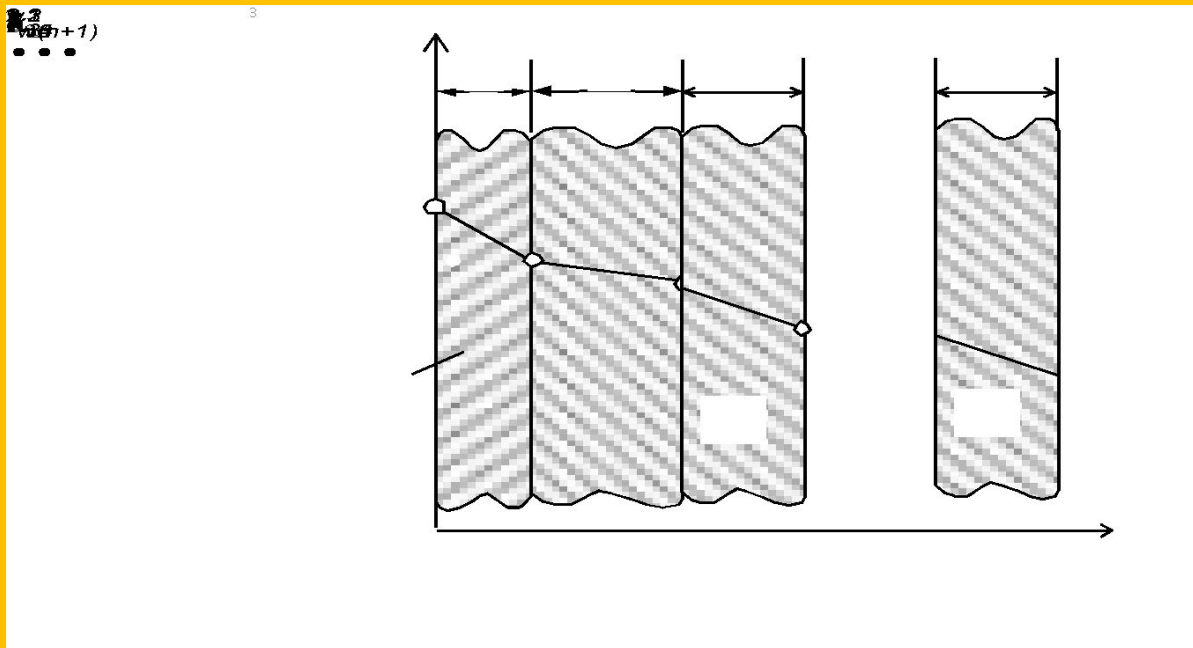
Тогда уравнение температурного поля в стенке:

$$t = t_{w1} - \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} x$$

По закону Фурье находим:

$$q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

# 11.8. Стационарная теплопроводность через многослойную плоскую стенку

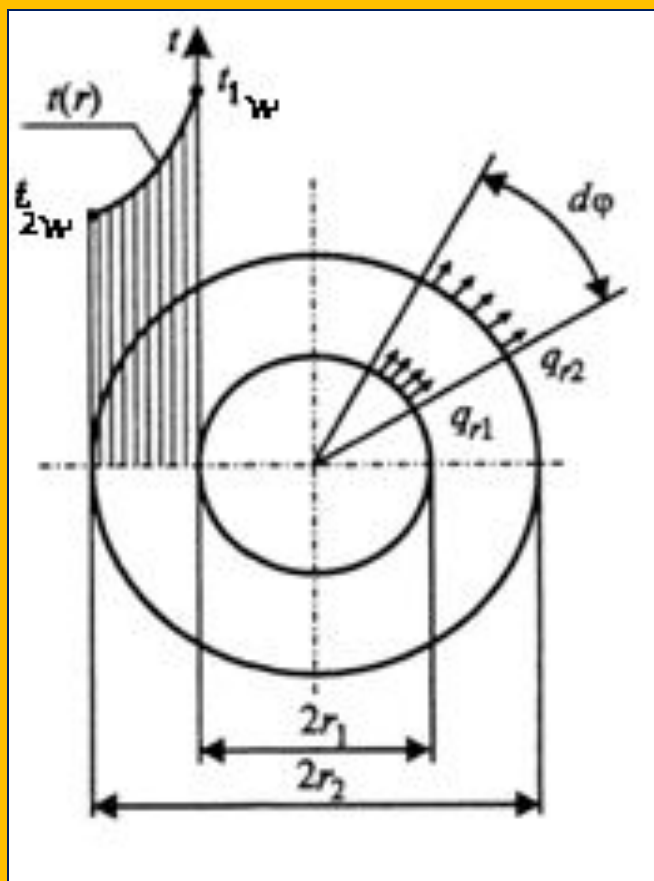


$$\left\{ \begin{array}{l} q = \lambda_1 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta_1} \\ q = \lambda_2 \frac{t_{w2} - t_{w3}}{\delta_2} \\ q = \lambda_3 \frac{t_{w3} - t_{w4}}{\delta_3} \\ \dots \dots \dots \\ q = \lambda_n \frac{t_{wn} - t_{wn+1}}{\delta_n} \end{array} \right.$$

Отсюда найдем плотность теплового потока :

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w(n+1)}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

# 11.9. Теплопроводность через цилиндрическую стенку



Из формулы Фурье тепловой поток через стенку длиной  $l$  на произвольном радиусе  $r$ :

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} \cdot F = -2\pi r l \lambda \frac{dt}{dr}$$

Разделив переменные и проинтегрировав от  $r_1$  до  $r_2$ , получим:

$$\frac{Q}{2\pi l \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} = t_{w1} - t_{w2}$$

Откуда:

$$Q = \frac{2\pi l \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_{w1} - t_{w2})$$

# Теплопроводность через цилиндрическую стенку

Величина плотности теплового потока различна для изотермических поверхностей различного радиуса:

$$q_{r_1} = \frac{Q}{2\pi r_1 l} = \frac{\lambda(t_{w1} - t_{w2})}{r_1 \ln r_2 / r_1} \quad \text{аналогично:} \quad q_{r_2} = \frac{\lambda(t_{w1} - t_{w2})}{r_2 \ln r_2 / r_1}$$

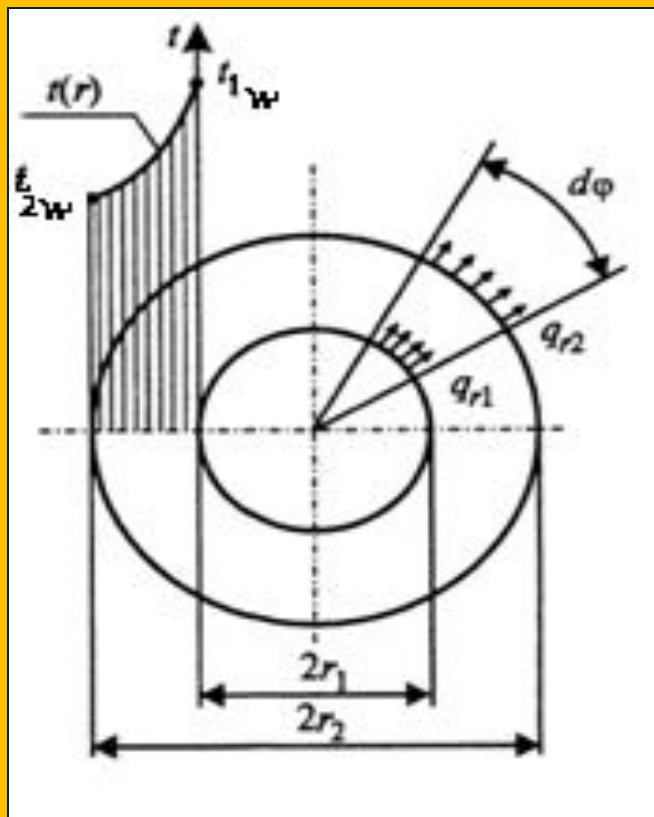
Величина теплового потока, отнесенная к единице длины цилиндра:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{2\pi\lambda}{\ln r_2 / r_1} (t_{w1} - t_{w2})$$

называется *погонной плотностью теплового потока*.

Эта величина одинакова на любом радиусе от  $r_1$  до  $r_2$ .

# Решение уравнения теплопроводности



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

Перейдем от декартовых к цилиндрическим

координатам, учитывая, что  $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$  и

получим  $\frac{\partial t}{\partial \phi} = 0$

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0$$

Откуда:  $t = A \ln r + B$ .

ГУ: при  $r = r_1$   $t = t_{w1}$ ; при  $r = r_2$   $t = t_{w2}$ .

$$\rightarrow A = -\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}; B = t_{w1} + \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln r_1$$

Подставляя значения констант интегрирования в общее решение :

$$t = t_{w1} - \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1}$$

# 11.10. Теплопроводность через многослойную цилиндрическую стенку

Погонная плотность теплового потока для всех слоёв одинакова:

Решение системы уравнений:

$$q_l = \frac{2\pi(t_{w1} - t_{w(n+1)})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}$$

ИЛИ

$$q_l = \frac{2\pi(t_{w1} - t_{w(n+1)})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}$$

$$q_l = 2\pi\lambda_1 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$q_l = 2\pi\lambda_2 \frac{t_{w2} - t_{w3}}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$$

.....  
.....

$$q_l = 2\pi\lambda_n \frac{t_{wn} - t_{w(n+1)}}{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}$$

# 11.11. Нестационарная теплопроводность

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

В простейшем случае одномерной задачи разогрева плоской бесконечной стенки постоянной толщины  $\delta$ :

$$\left( \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \right) \longrightarrow \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Рассмотрим случай с ГУ III рода на поверхностях стенки, определяемых интенсивностью теплоотдачи  $\alpha_r$  и  $\alpha_o$  и температурой греющей  $t_r$  и  $t_o$  охлаждающей сред, и при условии, что в начальный момент времени при  $\tau = 0$  температура стенки равна температуре холодной среды:

$$t(x, \tau = 0) = t_o$$

# Нестационарная теплопроводность

Решение уравнения:

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t_o}{t_r - t_o} = \frac{1 + Bi_o \frac{\delta - x}{\delta}}{1 + Bi_o + \frac{Bi_o}{Bi_r}} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\left[ Bi_o \sin \frac{\mu_i}{\delta} (\delta - x) + \mu_i \cos \frac{\mu_i}{\delta} (\delta - x) \right] \exp\left(-\mu_i^2 \frac{\alpha \tau}{\delta^2}\right)}{Bi_o \left( \sin \mu_i + \frac{1}{2} \mu_i \cos \mu_i \right) + \frac{\mu_i}{2} \left( 1 + \frac{Bi_o}{Bi_r} \right) (3 \cos \mu_i - \mu_i \sin \mu_i) - \frac{\mu_i^2}{Bi_r} \left( 2 \sin \mu_i + \frac{\mu_i}{2} \cos \mu_i \right)}$$

где  $\mu_i$  — корни характеристического уравнения:  $\operatorname{tg} \mu = \frac{\mu(Bi_o + Bi_r)}{\mu^2 - Bi_o Bi_r}$

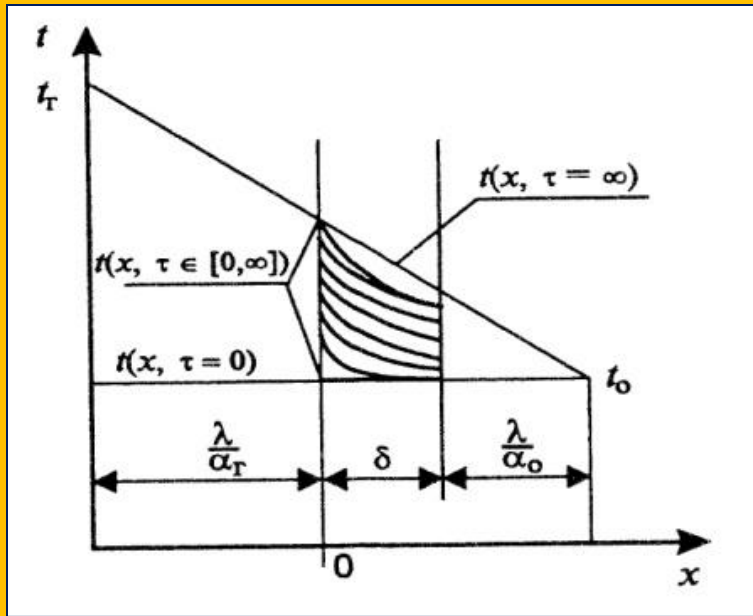
$$Bi_o = \frac{\alpha_o \delta}{\lambda}; Bi_r = \frac{\alpha_r \delta}{\lambda}$$

— числа (критерии) Био, характеризующие интенсивность теплообмена среды с поверхностью твердого тела.



# Нестационарная теплопроводность

С помощью этой формулы для  $\tau \rightarrow \infty$  можно определить температурное поле в стенке в условиях установившейся теплопроводности:



Характер изменения температуры в стенке при нестационарном режиме

$$\theta_{уст} = \frac{t(x, \tau \rightarrow \infty) - t_o}{t_r - t_o} = \left[ \frac{1 + Bi_o(\delta - x)/\delta}{1 + Bi_o + \frac{Bi_o}{Bi_r}} \right]$$

Обобщённое решение уравнения теплопроводности для одномерной задачи :

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t_o}{t_r - t_o} = f_1(Bi_r, Bi_o, x) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{f_2(Bi_o, Bi_r, \mu_i, x)}{f_3(Bi_o, Bi_r, \mu_i)} \exp\left(-\mu_i^2 \frac{a\tau}{\delta^2}\right)$$

Число Фурье:  $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$

# Контрольные вопросы и задания к главе 11

1. Как передается теплота в природе и технике?
2. Что представляет собой теплопроводность и как она осуществляется?
3. Что называется температурным полем и температурным градиентом?
4. Что называется плотностью теплового потока?
5. Что и как определяет закон Фурье?
6. Что называется коэффициентом теплопроводности? Его размерность?
7. Охарактеризовать влияние температуры на коэффициент теплопроводности.
8. Какой вид имеет дифференциальное уравнение теплопроводности?

# Контрольные вопросы и задания к главе 11

9. Какой вид принимает дифференциальное уравнение теплопроводности для случая одномерной стационарной передачи теплоты через плоскую стенку?
10. Определить краевые условия в задачах теплопроводности.
11. Определить граничные условия в стационарных задачах теплопроводности.
12. Как определить плотность теплового потока в случае стационарной теплопроводности через многослойную плоскую стенку при граничных условиях I рода?
13. Как определить погонную плотность теплового потока в случае стационарной теплопроводности через многослойную цилиндрическую стенку при граничных условиях I рода?
14. Назвать особенности стационарной теплопроводности через цилиндрическую стенку.

# Глава 12.

## КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

### 12.1. Понятия и определения

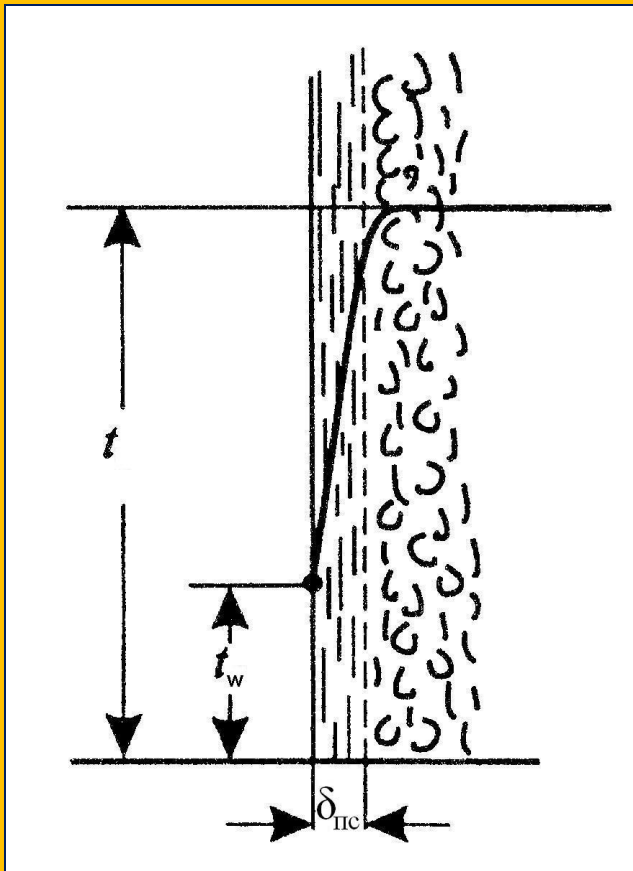
*Конвективным* называется теплообмен между поверхностью твердого тела и окружающей его жидкой или газообразной средой, перемещающейся относительно поверхности.

*Закон Ньютона—Рихмана:*  $q = \alpha(t_w - t)$

где  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), - коэффициент теплоотдачи,  
 $t_w$  — температура на поверхности твердого тела .

# Понятия и определения

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  равен плотности теплового потока при температурном напоре между поверхностью и омывающей ее средой ( $t_w - t$ ) в один Кельвин.



*Пограничным слоем называется тонкий слой жидкости или газа, в котором параметры процесса меняются от значений на стенке до значений в основном потоке.*

## 12.2 Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена

### 12.2.1. Система уравнений движения Навье—Стокса для вязкой несжимаемой жидкости

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{d\tau} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x; \\ \rho \frac{dw_y}{d\tau} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y; \\ \rho \frac{dw_z}{d\tau} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w_z \end{aligned} \right\}$$

где  $w_x$ ,  $w_y$ ,  $w_z$  - проекции вектора скорости на координатные оси;

$\mu$ , Н·с/м<sup>2</sup> — динамический коэффициент вязкости .

# Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена

## 12.2.2. Уравнение сплошности

Уравнение сплошности выражает закон сохранения массы в неразрывном потоке.

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0$$

Для несжимаемых жидкостей при  $\rho = \text{const}$ :

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$$

**Уравнение теплопроводности:**

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right]$$

# Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{d\tau} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x; \\ \rho \frac{dw_y}{d\tau} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y; \\ \rho \frac{dw_z}{d\tau} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w_z \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left[ \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right]$$



# Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена:

## 12.2.3. Краевые условия

Краевые условия, позволяют из бесчисленного множества решений выделить одно, относящееся к поставленной задаче.

К ним относятся:

- *геометрические*, характеризующие форму и размеры системы, в которой протекает процесс;
- *физические*, определяющие физические особенности процесса, обычно это теплофизические характеристики тела и окружающих его сред;
- *граничные*, описывающие закономерности протекания теплообмена на поверхностях тела;
- *временные*, характеризующие известные положения о развитии процесса во времени.

## 12.3. Основы теории подобия

### Определения

*Два физических явления подобны, если все характеризующие их однородные параметры в сходственных точках пространства и в сходственные моменты времени пропорциональны или связаны преобразованием подобия:*

$$\varphi_2(x_2; \tau_2) = \varphi_2(c_l x_1; c_\tau \tau_1) = \varphi_2(x_2; \tau_2) = c_\varphi \varphi_1(x_1; \tau_1)$$

где  $\varphi_1, \varphi_2$  — однородные параметры подобных процессов;  $c_l, c_\tau, c_\varphi$  — константы подобия.

*Подобные процессы описываются одинаковыми уравнениями и отличаются только масштабом описывающих их величин.*

# Основы теории подобия

Между константами подобия существуют соотношения, называемые индикаторами подобия и определяемые физическими законами исследуемых подобных процессов.

Эти соотношения могут быть выражены также и непосредственно через сами параметры, характеризующие подобные процессы, и в этом случае называются числами или критериями подобия.

## **Первая теорема подобия:**

*Подобные процессы имеют одинаковые числа подобия.*

# Основы теории подобия

## **Вторая теорема подобия:**

*Закон физического процесса может быть выражен математической зависимостью между соответствующими числами подобия.*

Для того чтобы два физических процесса были подобными, необходимо соблюдение условий геометрического, кинематического, временного, температурного и физического подобия, подобия сил, а также подобия начальных и граничных условий.

Геометрическое подобие означает подобие формы и пропорциональность размеров:  $\frac{x_2}{x_1} = \frac{y_2}{y_1} = \frac{z_2}{z_1} = c_l = const$   
константа геометрического подобия.

# Основы теории подобия

Временное подобие означает пропорциональность времен развития процессов:  $\frac{\tau_2}{\tau_1} = c_\tau = const$

— константа временного подобия.

Кинематическое подобие подразумевает одинаковую форму линий тока и пропорциональность скоростей:

$$\frac{w_{x_2}}{w_{x_1}} = \frac{w_{y_2}}{w_{y_1}} = \frac{w_{z_2}}{w_{z_1}} = c_w = const$$

— константа скоростного подобия.

Физическое подобие означает пропорциональность физических свойств во всех точках:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = c_\rho \quad \frac{v_2}{v_1} = c_v \quad \frac{a_2}{a_1} = c_a \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = c_\lambda$$

# Основы теории подобия

Подобие сил означает пропорциональность действующих сил:

$$; \quad \frac{f_{x_2}}{f_{x_1}} = c_f \quad \frac{p_2}{p_1} = c_p$$

Температурное подобие означает пропорциональность температур во всех точках:

$$\frac{t_2}{t_1} = c_t$$

— константа температурного подобия.

## 12.4. Числа гидромеханического подобия

$$Ho = \frac{w\tau}{l} = \text{idem}$$

- число гомохронности  $Ho$  представляет собой безразмерное время развития или проявления процесса.

Обратная величина  $Sh = \frac{l}{w \cdot \tau}$

— число Струхала — показывает соотношение сил инерции, вызванных локальными и конвективными ускорениями.

Число Фруда  $Fr = \frac{gl}{w^2} = \text{idem}$

характеризует соотношение потенциальной энергии в поле сил тяжести и кинетической энергии в потоке.

# Числа гидромеханического подобия

Число Эйлера: 
$$E_u = \frac{p}{\rho w^2}$$

показывает соотношение потенциальной энергии сил давления и кинетической энергии.

Или в виде 
$$E_u = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$$

показывает соотношение гидравлических потерь (перепада давления  $\Delta p$ ) и динамического напора  $\rho w^2$ .

Число Рейнольдса: 
$$Re = \frac{wl}{\nu} = idem$$

показывает соотношения сил инерции и сил вязкого трения.



## 12.5. Числа теплового подобия

$Fo = \frac{a\tau}{l^2}$  -число Фурье представляет собой безразмерное время развития процесса.

Число Пекле  $Pe = \frac{wl}{a}$

является мерой отношения конвективного переноса теплоты к переносу ее теплопроводностью в сжимаемой жидкости ( $\lambda_{ж}$ ) и устанавливает подобие температурных полей.

Число Нуссельта:  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_{ж}}$  основная безразмерная характеристика конвективного теплообмена.

Число Прандтля:  $Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a}$

# Числа теплового подобия

$$\text{Gr} = \text{Fr} \cdot \text{Re}^2 \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} = \frac{gl}{w^2} \left( \frac{wl}{\nu} \right)^2 \beta \Delta t = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t - \text{число Грасгофа.}$$

Во всех числах подобия величины  $w$  и  $\tau$  — характерная скорость и характерное время развития процесса.

Линейная величина  $l$  называется характерным размером.

*В качестве характерного размера выбирается размер, наиболее существенно влияющий на распределение температур и скоростей в потоке жидкости или газа.*

## 12.5. Критериальные уравнения конвективного теплообмена

Математическая модель процесса конвективного теплообмена может быть выражена математической зависимостью между числами теплового и гидромеханического подобия:

$$\text{Nu} = f_1 (\text{Gr}, \text{Re}, \text{Pe}, l/l_0) \text{ или } \text{Nu} = f_2 (\text{Gr}, \text{Re}, \text{Pr}, l/l_0).$$

$$\text{Nu} = c \text{Re}^m \text{Pr}^n (l/l_0)^p$$

$c, n, m, p$  – определяются экспериментально.

Коэффициент теплоотдачи: 
$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda_{\text{ж}}}{l}$$

## 12.6. Теплообмен в свободном потоке (естественная конвекция)

*Свободным называется движение жидкости или газа в поле сил тяжести, вызванное только разницей плотностей в частях заполняемого объема, обусловленной неоднородностью температурного поля. В этом случае конвекция называется естественной.*

Формула М.А. Михеева:

$$Nu = c (Gr Pr)^n.$$

Около вертикальных поверхностей :

$$c = 0,15; n = 0,33,$$

для горизонтальных поверхностей :  $c = 0,5; n = 0,25,$   
если  $GrPr \geq 6 \times 10^{10}$  (развитое турбулентное течение)

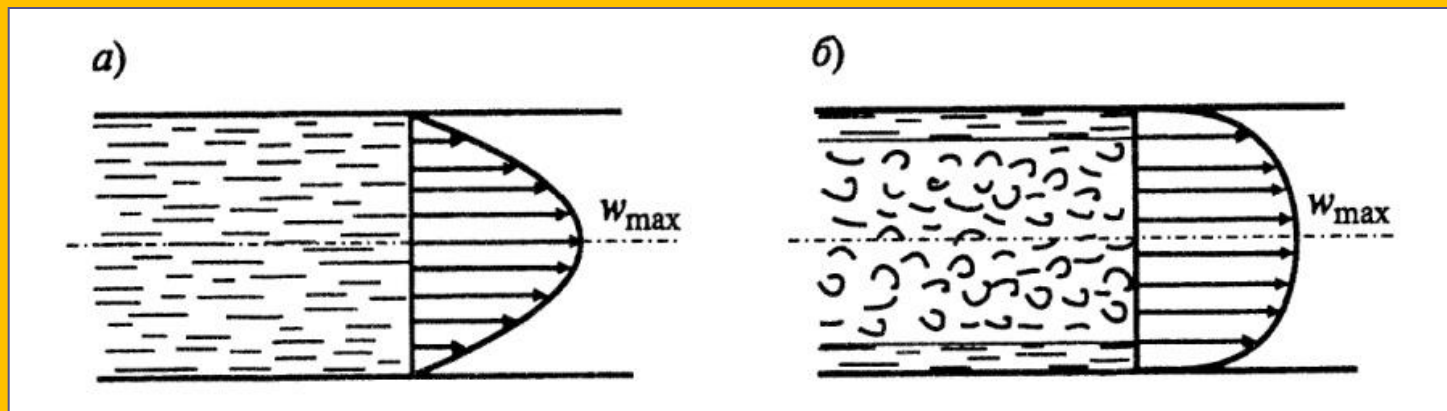
## 12.7. Теплообмен в вынужденном потоке (вынужденная конвекция)

Вынужденным называется движение, созданное специальным устройством для перемещения жидкости или газа (насос, вентилятор и т. п.).

### 12.7.1. Режимы движения вязкой среды

*Ламинарным называется движение, при котором слои жидкости или газа не перемешиваются и перемещаются параллельно друг другу*  
*Турбулентным называется движение, при котором частицы жидкости или газа движутся хаотично и происходит перемешивание слоев*

# Режимы движения вязкой среды



Распределение векторов скорости в вынужденных потоках жидкости в круглой прямой трубе  
а) при ламинарном движении; б) при турбулентном движении

В трубах и каналах: при числах Рейнольдса  $Re < Re_{кр} = 2300$  течение ламинарное, при  $Re > Re_{кр} = 2300$  — турбулентное.

## 12.7.2. Теплоотдача в каналах при ламинарном режиме движения

Формула М.А. Михеева:

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Gr^{0,1} Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

Поправка  $\left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}$

учитывает направление теплового потока (от стенки к жидкости или наоборот). Температурный фактор существен для жидкостей, особенно для нефтепродуктов. Для воздуха и двухатомных газов число  $Pr$  слабо зависит от температуры и эту поправку можно считать равной 1.

## 12.7.3. Теплоотдача в каналах при турбулентном режиме движения

Формула М.А. Михеева:

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25}$$

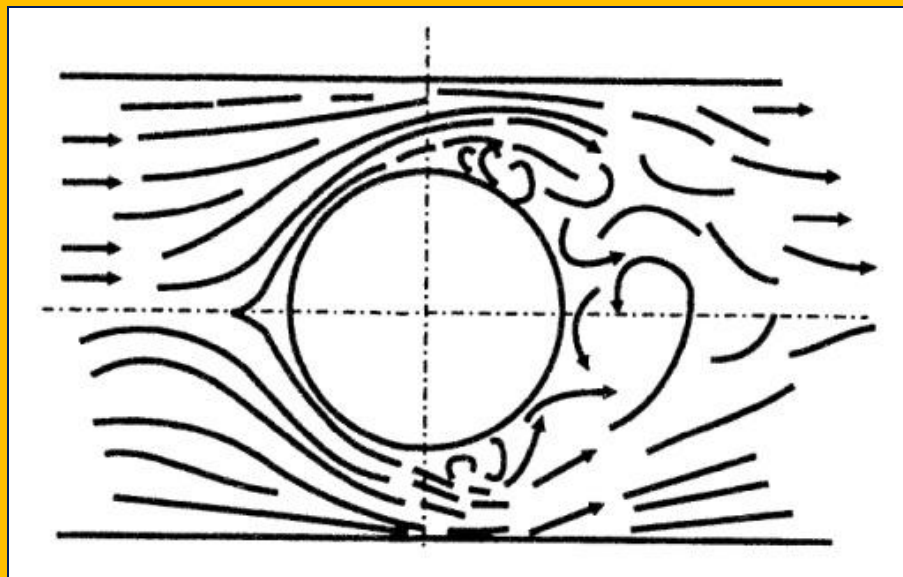
За характерный размер  $l$  при вынужденной конвекции в круглых трубах принимается внутренний диаметр.

Для труб и каналов некруглой формы за характерный размер принимают эквивалентный диаметр  $d_{\text{э}}$ :

$$d_{\text{э}} = \frac{4S}{\Pi}$$



## 12.7.4. Теплоотдача при поперечном омывании гладких труб



Формула А.А. Жукаускаса :

$$Nu = c Re^n Pr^{0,38} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

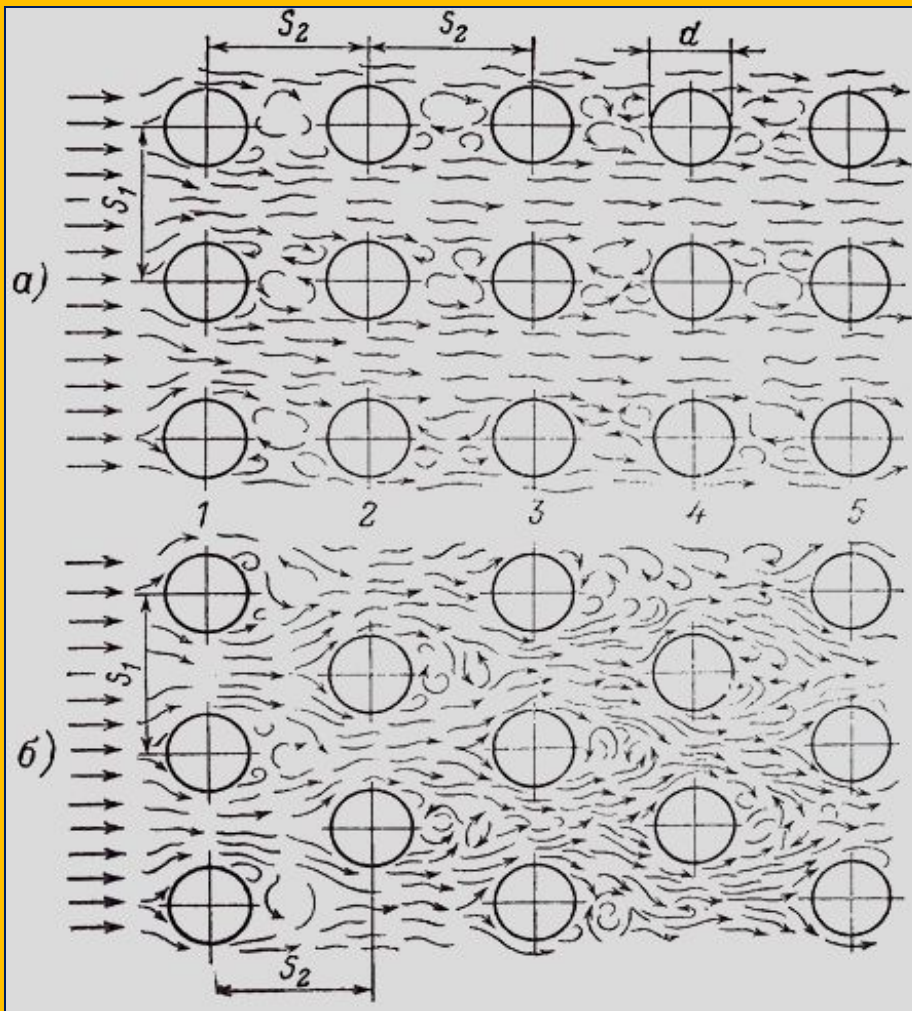
где  $c = 0,5$ ;  $n = 0,5$

при  $0 < Re < 10^3$ ;

$c = 0,25$ ;  $n = 0,6$  при  
 $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ ;

За характерный размер принят наружный диаметр трубы.

## 12.7.5. Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб



Схемы расположения труб в коридорных (а) и шахматных (б) пучках труб

$$Nu = c Re^n \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_s$$

в коридорном пучке  
 $c = 0,26, n = 0,65;$

в шахматном пучке  
 $c = 0,41, n = 0,6;$

за характерный размер принят наружный диаметр трубы.

# Теплоотдача при поперечном омывании пучков труб

$$\text{Nu} = c \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \varepsilon_s$$

$\varepsilon_s$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние относительного расположения рядов труб:

для коридорного пучка:

$$\varepsilon_s = \left( \frac{s_2}{d} \right)^{-0,15}$$

для шахматного пучка при  $\frac{s_1}{s_2} < 2$   $\varepsilon_s = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{\frac{1}{6}}$

при  $\frac{s_1}{s_2} \geq \varepsilon_s = 1,12$ .

Где  $s_1$  — поперечный шаг разбивки трубного пучка,  $s_2$  — продольный шаг разбивки трубного пучка.

# 12.8. Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния

## Теплообмен при кипении жидкости

При пузырьковом кипении различных жидкостей (включая жидкие металлы) в условиях свободного движения :  $Nu = c Re^n \cdot Pr^{0,33}$

При

$$Re = 10^{-5} \div 10^4$$

$$Pr = 0,86 \div 7,6$$

Re	c	n
$\leq 0,01$	0,0625	0,50
$\geq 0,01$	0,1250	0,65

Для давлений  $p = 0,2 \div 80$  бар:  $\alpha = 46 \Delta t^{2,33} p^{0,5}$ ,

где  $\Delta t = t_w - t_s$ ,  $t_w$  — температура стенки, °С;

$t_s$  — температура насыщения, °С;

$p$  — абсолютное давление пара, бар.

# Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния

## Теплоотдача при конденсации пара

Существуют два режима конденсации: *капельная* и *плёночная конденсация*.

Для плёночной конденсации:  $Nu = f(Pr, Ga, K)$ ,

Где  $K = \frac{r}{c_p \Delta t_k}$  число Кутателадзе,

$Ga = Fr Re^2 \frac{gl^3}{\nu^2}$  число Галилея,

$r$  — скрытая теплота парообразования;

$c_p$  — теплоемкость конденсата.

# Конвективный теплообмен при изменении агрегатного состояния

## Теплоотдача при конденсации пара

При конденсации на вертикальных и горизонтальных поверхностях:

$$Nu_{\text{конд.}} = c \cdot \sqrt[4]{Ga_{\text{ж}} Pr_{\text{ж}} K} \rightarrow \alpha = c \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{ж}}^3 \rho_{\text{ж}}^2 r}{\mu_{\text{ж}} \Delta t_{\text{к}} l}}$$

параметры  $\lambda_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\mu_{\text{ж}}$  и числа подобия определяются при температуре

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(t_s + t_w)$$

$r$  — скрытая теплота парообразования при температуре насыщения  $t_s$ ;

Определяющим размером  $l$  является высота для вертикальных поверхностей или наружный диаметр для горизонтальных труб; коэффициент  $c = 1.13$  для вертикальных поверхностей, и  $c = 0,72$  для горизонтальных поверхностей.

# Контрольные вопросы и задания к главе 12

1. Что называется конвективным теплообменом?
2. Что называется коэффициентом теплоотдачи?
3. Написать основные уравнения конвективного теплообмена.
4. Какие физические процессы называются подобными?
5. Что представляют собой безразмерные характеристики физических процессов (числа или критерии подобия)?
6. Назвать основные числа подобия процессов конвективного теплообмена.

# Контрольные вопросы и задания к главе 12

7. Записать критериальные уравнения конвективного теплообмена (общий вид).

8. Как изменяется интенсивность конвективного теплообмена в зависимости от режима движения обтекающей поверхность твердого тела жидкости (газа)?

9. Охарактеризовать конвективный теплообмен в условиях кипения жидкости, назвать критические точки.

10. Охарактеризовать конвективный теплообмен в условиях конденсации пара.

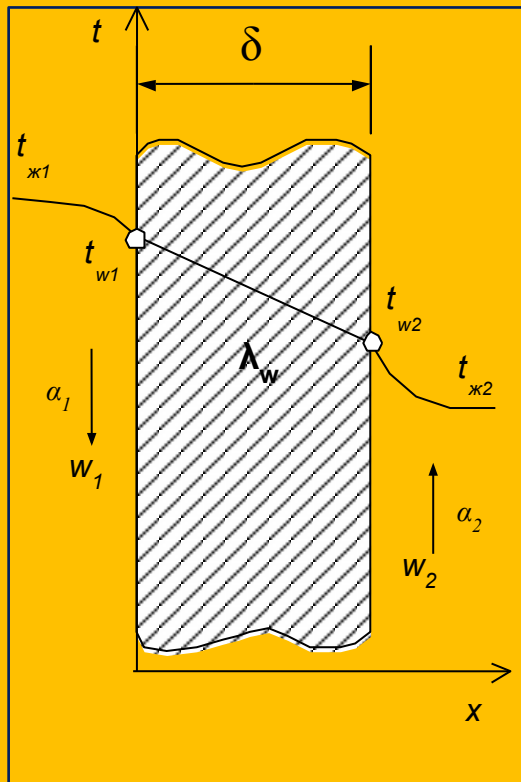


# Глава 13.

## ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

*Теплопередачей* (или рекуперативным теплообменом) называют процесс распространения теплоты от одной движущейся среды (теплоносителя) к другой движущейся среде через разделяющую их твердую стенку.

# 13.1. Теплопередача через однослойную и многослойную плоские стенки



По закону Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{w1});$$

по закону Фурье:

$$q = \lambda_w \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

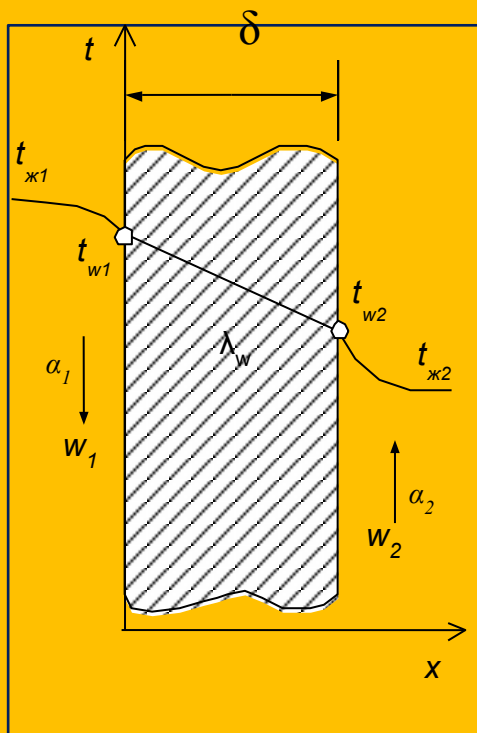
по закону Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha_2 (t_{w2} - t_{ж2}),$$

откуда:

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2}} = k(t_{ж1} - t_{ж2})$$

# Теплопередача через однослойную стенку



$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2}} = k(t_{ж1} - t_{ж2})$$

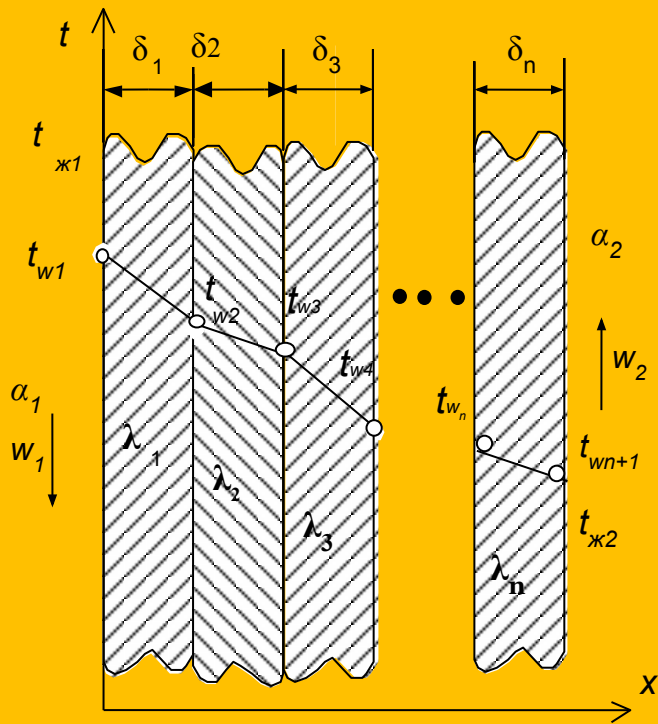
где:

$$k = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}$$

коэффициент теплопередачи.

**Коэффициент теплопередачи** численно равен количеству теплоты, которое передается через единицу поверхности стенки в единицу времени при температурном напоре в 1К между омывающими стенку теплоносителями.

# Теплопередача через многослойную стенку



$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}} = k(t_{ж1} - t_{ж2})$$

где:

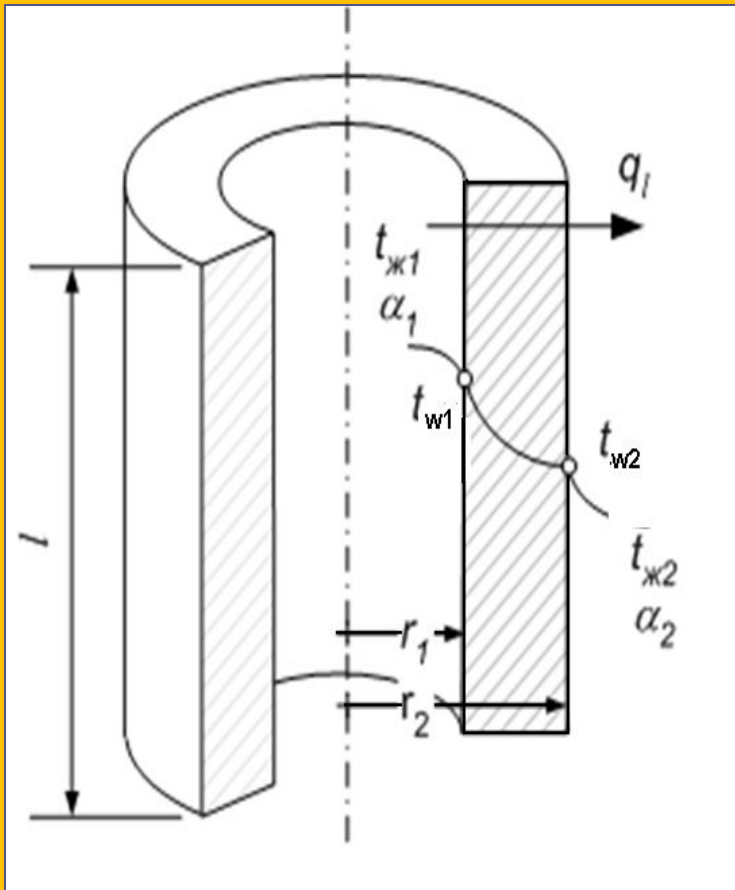
$$k = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

коэффициент теплопередачи.

Величина, обратная  $k$ , называется *термическим сопротивлением теплопередачи*  $R$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ :

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$$

## 13.2. Теплопередача через цилиндрическую стенку



Плотность теплового потока :

$$q_{r_1} = \frac{Q}{2\pi r_1 l} \quad ; \quad q_{r_2} = \frac{Q}{2\pi r_2 l}$$

Погонная плотность теплового потока:

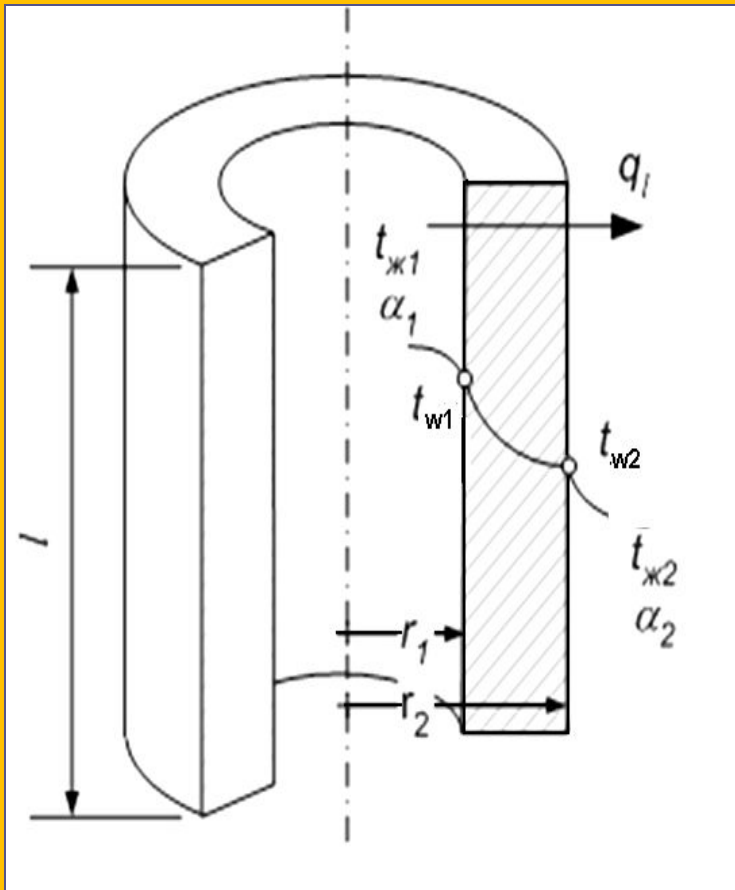
$$q_l = \frac{Q}{l} \quad ,$$

откуда:  $q_l = 2\pi r_1 q_{r_1} = 2\pi r_2 q_{r_2}$

где по закону Ньютона—Рихмана:

$$q_{r_1} = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{w1}); \text{ и}$$
$$q_{r_2} = \alpha_2 (t_{w2} - t_{ж2}).$$

# Теплопередача через цилиндрическую стенку



Откуда  $q_l = 2\pi r_1 \alpha_1 (t_{ж1} - t_{w1})$

и:  $q_l = 2\pi r_2 \alpha_2 (t_{w2} - t_{ж2})$

Тепловой поток через твердую  
стенку:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{2\pi \lambda_w}{\ln r_2 / r_1} (t_{w1} - t_{w2})$$

Погонная плотность теплового  
потока через однослойную  
цилиндрическую стенку:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_w} \ln r_2 / r_1 + \frac{1}{\alpha_2 r_2}} (t_{ж1} - t_{ж2})$$

# Теплопередача через цилиндрическую стенку

Или  $q_l = k_l(t_{ж1} - t_{ж2})$

где  $k_l = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_w \ln r_2 / r_1} + \frac{1}{\alpha_2 r_2}}$   
Вт/(м·К)

— погонный коэффициент теплопередачи.

Для многослойной цилиндрической стенки:

$$k_l = 2\pi \left( \frac{1}{\alpha_1 r_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{\alpha_2 r_{n+1}} \right)^{-1}$$

где  $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя стенки;  
 $r_i$  — внутренний радиус  $i$ -го слоя

## 13.3. Термическое сопротивление. Критическая толщина изоляции

Погонное термическое сопротивление  $R_l$  (м·К)/Вт :

$$R_l = \frac{1}{2\alpha_1\pi r_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{2\alpha_2\pi r_{n+1}}$$

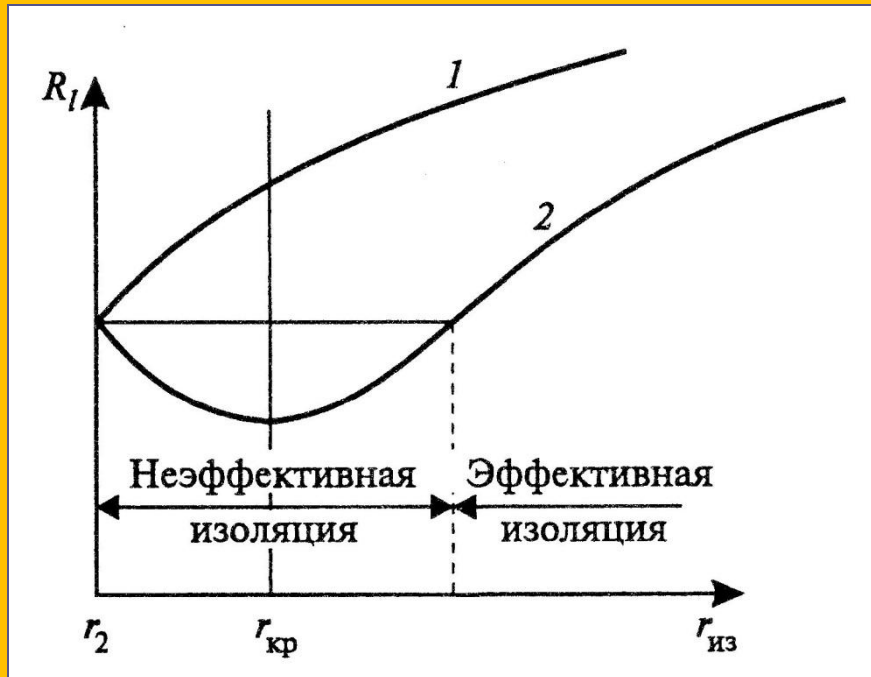
*Тепловой изоляцией называют любое покрытие теплоотдающей поверхности, которое приводит к снижению потерь теплоты в окружающую среду.*

$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{2\alpha_1\pi r_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_w} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \ln \frac{r_{из}}{r_2} + \frac{1}{2\alpha_2\pi r_{из}}$$

Критическому значению радиуса изоляции :  $r_{из} = r_{кр} = \frac{\lambda_{из}}{\alpha_2}$   
соответствует минимальное значение термического сопротивления  $R_{l_{min}}$



# Критическая толщина изоляции



Критический радиус изоляции зависит только от теплопроводящих свойств изоляции ( $\lambda_{из}$ ) и интенсивности теплообмена на внешней поверхности изоляции ( $\alpha_2$ ):

$$r_{из} = r_{кр} = \frac{\lambda_{из}}{\alpha_2}$$

Наложение изоляции толщиной  $\delta_{из} < (r_{кр} - r_2)$  (кривая 2) только увеличивает теплотерю.

В случаях  $r_2 > r_{кр}$  (кривая 1) изоляция любой толщины увеличивает общее термосопротивление.

# Контрольные вопросы и задания к главе 13

1. Какой процесс называется теплопередачей?
2. Что называется коэффициентом теплопередачи?
3. Что такое термическое сопротивление?
4. Как определить коэффициент теплопередачи через плоскую многослойную стенку?
5. Как определить коэффициент теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку?
6. Как определяется критический радиус изоляции теплоносущей трубы?

# Глава 14.

## ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН

### 14.1. Основные понятия и определения

*Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела в виде электромагнитных волн. Так называют электромагнитные возмущения, исходящие из излучаемого тела и распространяющиеся в вакууме со скоростью света  $c = 2,9979 \times 10^8$  м/с.*

# Основные понятия и определения

Возбудителями электромагнитных волн являются заряженные частицы, т. е. электроны и ионы, входящие в состав вещества. **Излучение в диапазоне длин волн  $\lambda = 0,8...100$  мкм является тепловым.**

Интенсивность излучения зависит от природы тела, его температуры, длины волны, состояния поверхности для газов — еще от толщины слоя и давления.

**С увеличением температуры тела его энергия излучения увеличивается, так как увеличивается внутренняя энергия вещества.**

# Основные понятия и определения

$$A = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}} \text{ — коэффициент поглощения;}$$

$$R = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} \text{ — коэффициент отражения;}$$

$$D = \frac{E_{\text{проп}}}{E_{\text{пад}}} \text{ — коэффициент пропускания.}$$

$$A + R + D = 1$$

*Тела, которые пропускают всю падающую на них энергию, называются прозрачными .*

*Тела, у которых  $0 < D \leq 1$ , называют полупрозрачными (стекло, кварц и т. п.).*

# Основные понятия и определения

Поверхность, поглощающая всю падающую на нее лучистую энергию ( $A_s = 1$ ), называется *абсолютно черной*.

Поверхность, отражающая все падающие на нее лучи ( $R = 1$ ), называется *абсолютно белой*.

Интегральный (во всем диапазоне волн) лучистый поток с единицы поверхности в полупространство в единицу времени называется *излучательной способностью* или *плотностью интегрального излучения тела*  $E$ , Вт/м<sup>2</sup>: 
$$E = \frac{dQ}{dF}$$

Интенсивность излучения  $I_\lambda$ , Вт/м<sup>3</sup>: 
$$I_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$$

## 14.2. Основные законы теплового излучения

Интенсивность излучения абсолютно черного тела в вакуум определяется *законом Планка*:

$$I_{\lambda_s} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

где  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$  м·К — постоянные Планка.

Длина волны  $\lambda_{ms}$  мм, соответствующая максимальному значению интенсивности монохроматического излучения, при данной температуре подчиняется закону смещения Вина:

$$\lambda_{ms} \cdot T = 2,9.$$

# Основные законы теплового излучения

Закон Стефана—Больцмана:  $E_s = c_s \left( \frac{T}{100} \right)^4$

определяет интегральную плотность излучения абсолютно черного тела в вакуум, где  $c_s = 5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Плотность интегрального излучения серого тела :

$$E = c \left( \frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon c_s \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

где  $c = \varepsilon c_s$  — коэффициент излучения серого тела.



# Основные законы теплового излучения

## Закон Кирхгофа:

*соотношение излучательной и поглощательной способностей серых тел при одинаковой температуре постоянно и равно излучательной способности при той же температуре абсолютно черного тела:*

$$E/A = E_s \text{ или } E/E_s = c/c_s = \varepsilon = A.$$

Плотность интегрального излучения серого тела :

$$E = c \left( \frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon c_s \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

где  $c = \varepsilon c_s$  — коэффициент излучения серого тела.

## 14.3. Излучение газов

Плотность теплового излучения между стенкой и проходящим около нее газом :

$$q = \varepsilon'_w c_s \left[ \varepsilon_\Gamma \left( \frac{T_\Gamma}{100} \right)^4 - \varepsilon_{\Gamma_w} \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$$

где  $\varepsilon'_w = \frac{\varepsilon_w + 1}{2}$  эффективная степень черноты стенок канала;

$\varepsilon_\Gamma = \frac{q_\Gamma}{q_s}$  отношение количества энергии

излучения газов и абсолютно черного тела

( $\varepsilon_\Gamma$  — при температуре газа  $T_\Gamma$ ;  $\varepsilon_{\Gamma_w}$  — при температуре стенки  $T_w$ ).

## 14.4. Излучение между твердыми телами

Плотность теплового излучения между параллельными поверхностями :

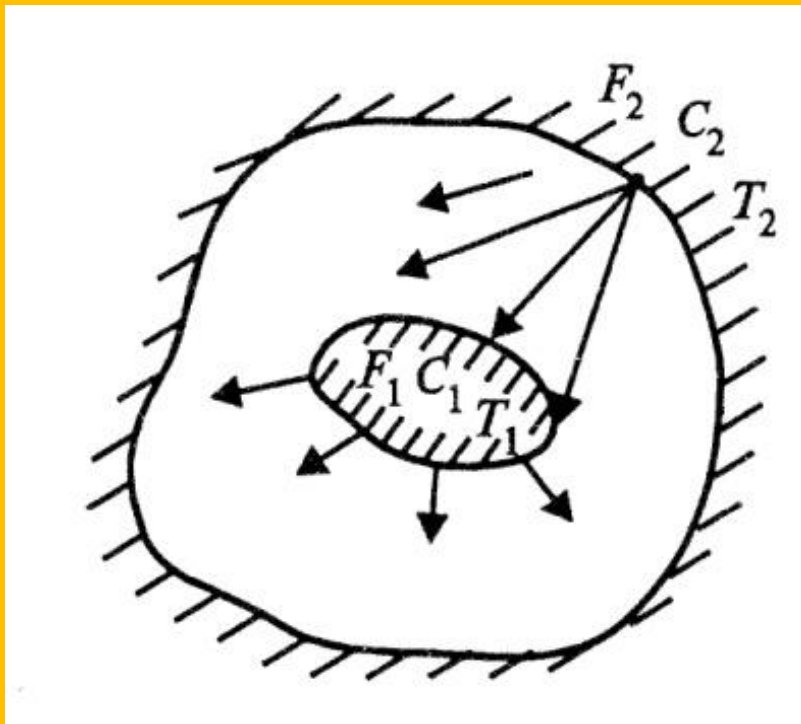
$$q = c_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

где индексы 1 и 2 относятся к первой и второй поверхностям,

$$c_{\text{пр}} = \left( \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_s} \right)^{-1} \quad \text{— приведенный коэффициент излучения,}$$

$c_1, c_2$  — коэффициенты излучения 1 и 2 тела соответственно.

# Взаимное тепловое облучение двух поверхностей



Тепловой поток между двумя излучающими поверхностями :

$$Q = c_{\text{пр}} F_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где

$$c_{\text{пр}} = \left[ \frac{1}{c_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_s} \right) \right]^{-1}$$

# Контрольные вопросы и задания к главе 14

1. Какова физическая сущность лучистого теплообмена?
2. Что представляет собой абсолютно черная поверхность твердого тела?
3. Как определяется интегральная плотность излучения абсолютно черной поверхности?
4. Чему равен коэффициент излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана—Больцмана)?
5. Как определяется плотность интегрального излучения серого тела?
6. Что устанавливает закон Кирхгофа?

# Контрольные вопросы и задания к главе 14

7. Как рассчитывается лучистый теплообмен между стенкой и газом?
8. Как определяется эффект лучистого теплообмена между твердыми телами?
9. Как влияют на лучистый теплообмен между телами разделительные экраны?

# Глава 15. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

## 15.1. Типы теплообменных аппаратов

Если теплообмен осуществляется при непосредственном смешении теплоносителей в теплообменнике, то такой теплообменник называется *смесительными*.

# Типы теплообменных аппаратов

Если теплообмен осуществляется в условиях периодически меняющегося протока теплоносителя и теплоприемника в одном попеременно нагреваемом и охлаждаемом канале, то такие теплообменники называются *регенеративными*.

*В рекуперативных теплообменниках* обменивающиеся теплотой среды разделены стенкой.



# 15.2. Основы расчета рекуперативного теплообменника

## Тепловой баланс

Тепловая мощность теплообменника:

$$Q = G_{\text{гор}} c_{\text{гор}} (t'_{\text{гор}} - t''_{\text{гор}}) = G_{\text{хол}} c_{\text{хол}} (t''_{\text{хол}} - t'_{\text{хол}})$$

С другой стороны:  $Q = kF \Delta t_{\text{ср}}$

или  $Q = lk_l \Delta \bar{t}_{\text{ср}}$  для цилиндрических  
теплообменных поверхностей,

где  $F$  — суммарная площадь поверхности;

$l$  — суммарная длина теплообменных элементов.

# Основы расчета рекуперативного теплообменника

## Среднелогарифмический перепад температур

Для прямотока: 
$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t'_{\text{гор}} - t'_{\text{хол}}) - (t''_{\text{гор}} - t''_{\text{хол}})}{\ln \frac{t'_{\text{гор}} - t'_{\text{хол}}}{t''_{\text{гор}} - t''_{\text{хол}}}}$$

для противотока: 
$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t'_{\text{гор}} - t''_{\text{хол}}) - (t''_{\text{гор}} - t'_{\text{хол}})}{\ln \frac{t'_{\text{гор}} - t''_{\text{хол}}}{t''_{\text{гор}} - t'_{\text{хол}}}}$$

где  $t'$ ,  $t''$  - температуры сред на входе и выходе из теплообменного аппарата, соответственно.

# Контрольные вопросы и задания к главе 15

1. Что называется рекуперативным теплообменом?
2. Как выбрать формулу для расчета числа Нуссельта для теплоносителя, движущегося внутри труб?
3. Какой теплообменник называется регенеративным?
4. Как определить среднелогарифмический перепад температур в теплообменнике?

**Овсянников Михаил  
Константинович**

доктор технических наук, профессор;

**Орлова Елена Геннадьевна**

кандидат технических наук, доцент;

**Костылев Иван Иванович**

доктор технических наук, профессор  
кафедры

«Теплотехника, судовые котлы и  
вспомогательные установки»

«ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

ФГБОУ ГУМРФ