

ФБГОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»
Кафедра двигателей внутреннего сгорания



Теплотехника»

**Часть 3.
Основы теплопередачи**

составлен
кандидатом технических наук, доцентом
Ивневым
Александром Андреевичем
в соответствии с действующим государственным
образовательным стандартом ВО

Ярославль, 2014-2016

Дисциплина «Теплопередача»

```
graph TD; A[Дисциплина «Теплопередача»] --> B[Предмет изучения]; A --> C[Цель изучения]; B --> D[самопроизвольные (необратимые) процессы распространения энергии в виде теплоты в среде с неоднородным распределением температур или между телами, сопровождающиеся массопереносом или без него]; C --> E[определение температурного поля в телах, расчет интенсивности теплопередачи в элементах энергоустановок (теплообменниках)];
```

Предмет изучения

самопроизвольные (необратимые) процессы распространения энергии в виде теплоты в среде с неоднородным распределением температур или между телами, сопровождающиеся массопереносом или без него

Цель изучения

определение температурного поля в телах, расчет интенсивности теплопередачи в элементах энергоустановок (теплообменниках)

Основные понятия теории теплопередачи

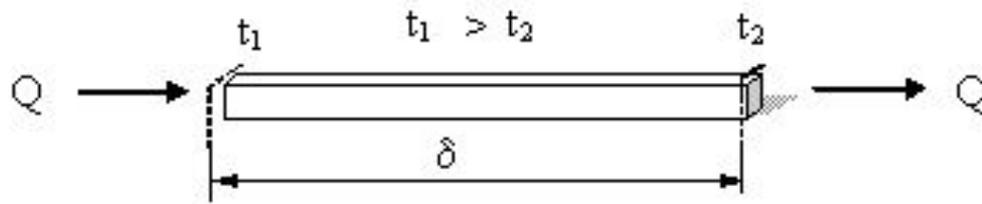
- 1. Температура** – мера внутренней (кинетической) энергии;
- 2. Температурное поле** – совокупность значений температур в каждой точке тела (или среды) в каждый момент времени.
- 3. Изотермическая поверхность** – совокупность значений одинаковых температур в неоднородном **3-х мерном** температурном поле.
- 4. Изотерма** – линия, получаемая при сечении изотермической поверхности плоскостью.
- 5. Перепад температур Δt** – разность температур между двумя изотермическими поверхностями (линиями), поверхностью и окружающей средой.
- 6. Градиент температуры** - отношение температурного перепада Δt между двумя изотермами к расстоянию между ними по нормали Δn .

Основные понятия теории теплопередачи

Градиент температуры – вектор, численно равный производной от температуры по нормали к изотермической поверхности и направленный в сторону увеличения температуры.

$$\lim \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad} t = \nabla t$$

Единицы измерения градиента температуры **К/м**.



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

$$\text{grad}_x t = \frac{\partial t}{\partial x}$$

$$\text{grad}_y t = \frac{\partial t}{\partial y}$$

$$\text{grad}_z t = \frac{\partial t}{\partial z}$$

Основные понятия теории теплопередачи

Тепловой поток – количество теплоты (Дж), передаваемое в единицу времени от более «нагретого» к менее «нагретому» телу, Вт.

$$\Phi = \frac{Q}{\tau}$$

Плотность (поверхностная) теплового потока – тепловой поток, отнесенный к единице площади теплопередающей поверхности, Вт/м²; является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону уменьшения температуры противоположно grad t:

$$q = \frac{Q}{\tau \cdot S}$$

Плотность (линейная) теплового потока – тепловой поток, отнесенный к единице длины теплопередающей цилиндрической поверхности, Вт/м.

$$q_l = \frac{Q}{\tau \cdot L}$$

СПОСОБЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Теплопроводность

Конвекция

Излучение



Теплопроводность

Теплопроводность – вид теплопередачи, при котором перенос энергии в форме теплоты в неравномерно нагретой сплошной среде, имеет атомно-молекулярный характер, не связанный с макроскопическим движением среды.

Необходимое условие – наличие свободных частиц (молекул).

Установлено опытным путем, что количество переносимой теплоты зависит: от физической природы тела (теплопроводность), геометрии (толщина стенки, площади поперечного сечения), разности температур, длительности процесса (времени!): $Q=f(\delta, S, \lambda, \Delta T, \tau)$, Дж.

Основной закон теплопроводности (гипотеза Био-Фурье) :

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad \text{Вт/м}^2.$$

где λ - коэффициент теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности

Вещества	Коэффициент теплопроводности	Особенности
Газы	0,005-0,6	с увеличением температуры увеличивается.
Воздух	0,025	
Жидкости	0,065-0,70	с увеличением температуры уменьшается за исключением воды и глицерина.
Вода	0,65	
Теплоизоляционные материалы	0,04-3,0	с увеличением температуры увеличивается.
Металлы	20-419	У чистых металлов с увеличением температуры убывает (кроме бериллия).

Конвекция

Конвекция – вид теплопередачи, осуществляемый за счет перемещения массы неравномерно нагретой жидкой или газообразной среды.

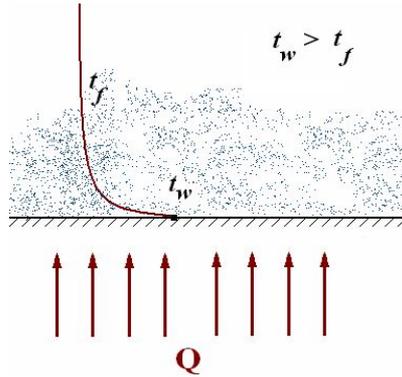
Конвекция **вынужденная** осуществляется под действием внешних силовых полей;

Конвекция **свободная** - осуществляется под действием объемных сил.

Конвективный теплообмен – результат совместного действия и теплопроводности и конвекции в одной и той же среде

Теплоотдача (конвективная теплоотдача) - конвективный теплообмен между твердой поверхностью и окружающей средой (жидкостью или газом).

Конвективная теплоотдача



Теплоотдача (конвективная теплоотдача) - конвективный теплообмен между твердой поверхностью и окружающей средой (жидкостью или газом).

Установлено опытным путем, что количество передаваемой теплоты зависит от *физической природы среды, свойств границы среды и твердого тела, разности температур между средой и поверхностью.*

Основной закон теплоотдачи (Ньютона-Римана) - плотность теплового потока на границе жидкости (газа) и твердой поверхности пропорциональна разности их температур:

$$q = \alpha \cdot (t_w - t_f)$$

где α -коэффициент теплоотдачи;

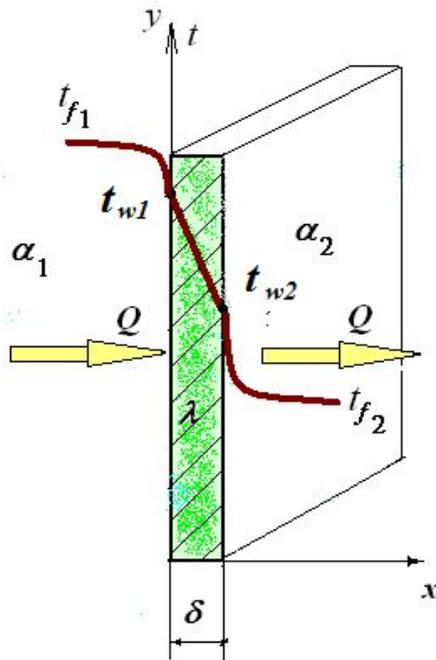
t_w -температура поверхности; t_f -температура жидкости или газа.

**Примерные значения коэффициентов теплоотдачи
 α , Вт/(м²К)
для характерных случаев теплоотдачи**

Режим течения	α
Свободная конвекция газов	5 ÷ 50
Вынужденная конвекция газов.	30 ÷ 500
Свободная конвекция воды	100 ÷ 1000
Вынужденная конвекция воды	500 ÷ 30000
Кипение воды	2000 ÷ 40000
Пленочная конденсация водяного пара	4000-15000

Стационарная теплопередача через плоскую стенку

Плотность теплового потока



$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

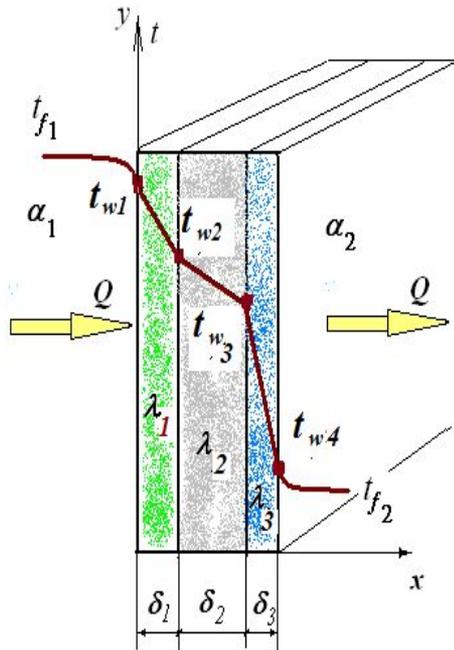
$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_{t\Sigma}}$$

где $\frac{1}{\alpha_1}$, $\frac{1}{\alpha_2}$, $\frac{\delta}{\lambda}$ - термические сопротивления

$$R_{t\Sigma} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad - \quad \text{полное термическое сопротивление}$$

Стационарная теплопередача через плоскую неоднородную стенку

Плотность теплового потока



$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_{t\Sigma}}$$

где

$$R_{t\Sigma} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$$

- суммарное термическое сопротивление многослойной стенки

Температуры поверхностей и на границах слоев :

$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q}{\alpha_1} \qquad t_{w2} = t_{f1} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right)$$

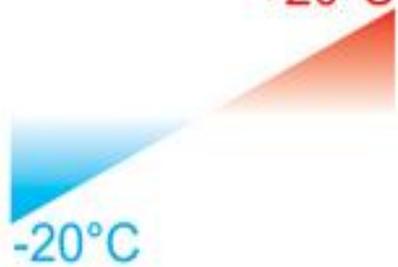
$$t_{w_{n+1}} = t_{f1} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)$$

ГДЕ n – КОЛИЧЕСТВО СЛОЕВ

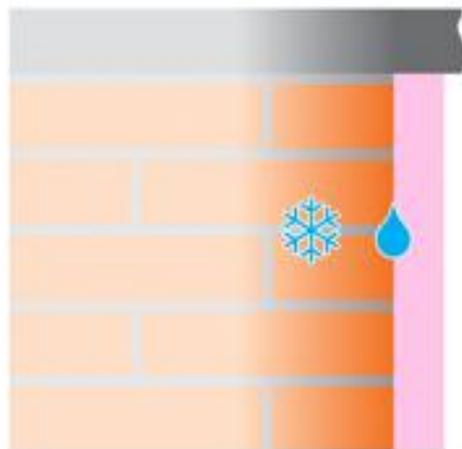
БЕЗ УТЕПЛЕНИЯ



+20°C



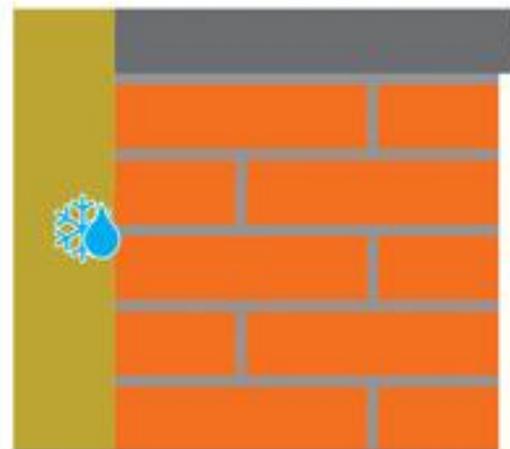
УТЕПЛЕНИЕ ВНУТРИ



+20°C



УТЕПЛЕНИЕ СНАРУЖИ

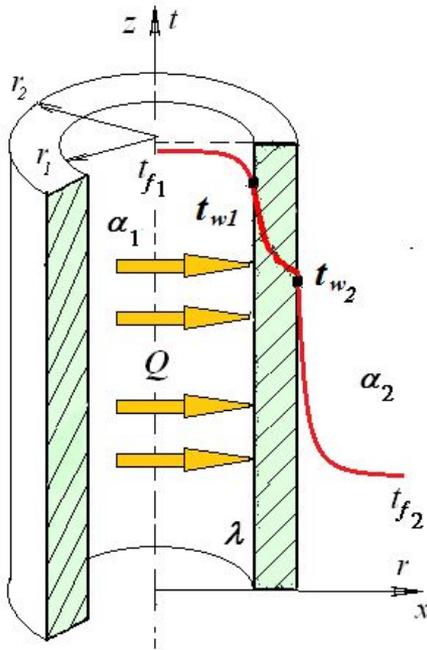


+20°C



Стационарная теплопередача через цилиндрическую стенку

Линейная плотность теплового потока



$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_{f1} - t_{f2})}{R_l}$$

где $R_{il} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}$

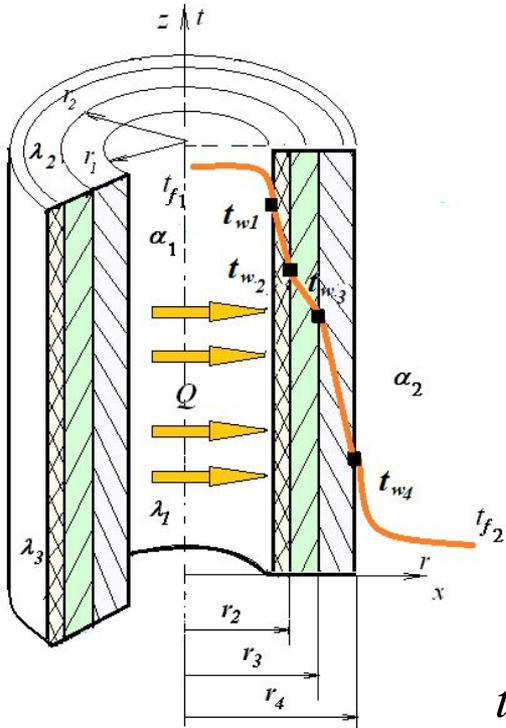
-полное
сопротивление

линейное

термическое

Стационарная теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку

Линейная плотность теплового потока



$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_{f1} - t_{f2})}{R_{tl}}$$

где $R_{tl} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}$

-суммарное линейное термическое сопротивление

Температуры поверхностей и на границах слоев :

$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q_l}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1}$$

$$t_{w2} = t_{f1} - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \right)$$

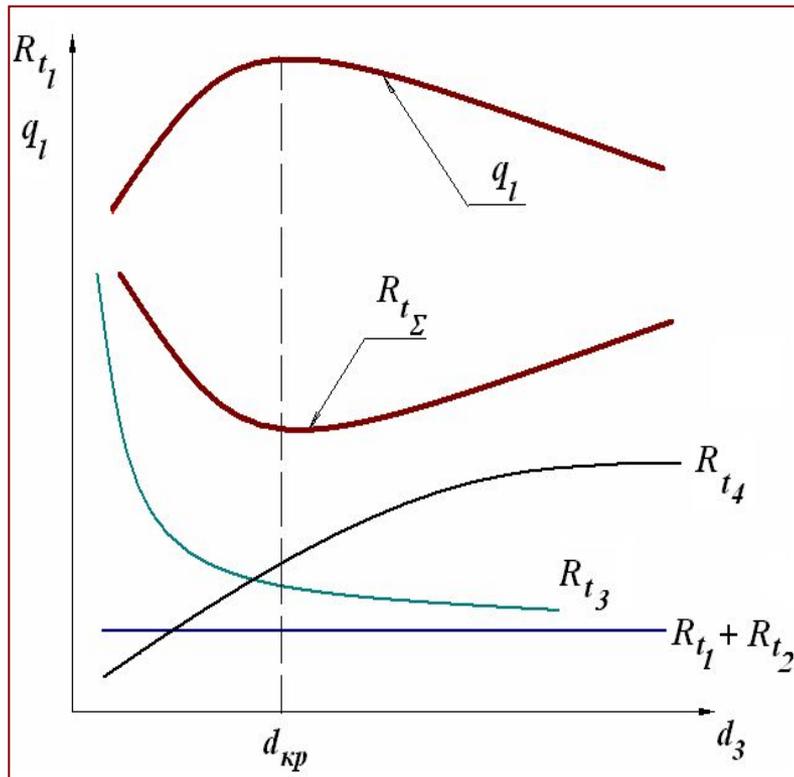
$$t_{w(i+1)} = t_{f1} - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \right)$$

$$t_{w(n+1)} = t_{f2} + \frac{q_l}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2}$$

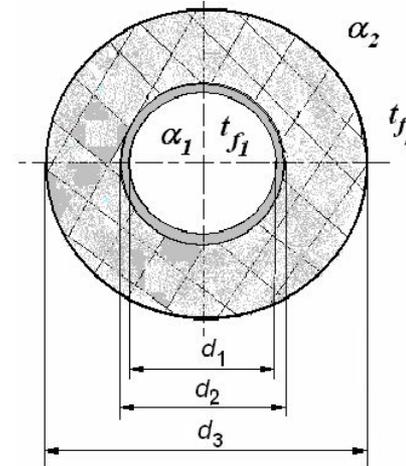
Тепловая изоляция на трубе

Тепловая изоляция – это слой материала с низким коэффициентом теплопроводности на теплопередающей поверхности.

Назначение тепловой изоляции: снижение тепловых потерь, снижение температуры поверхности.



$$d_{кр} \leq d_2$$



$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3}}$$

$$d_{\text{э}\delta} = \frac{2\lambda}{\alpha_2}$$

Основные положения теории подобия. Критерии и числа подобия.

Подобными являются процессы,

- имеющие одинаковую физическую природу (описываются одинаковыми уравнениями);
- осуществляемые **в геометрически** подобных системах.
- у которых поля физических величин, определяющие процессы на границе рассматриваемых поверхностей заданы подобным же образом (подобие граничных условий).
- у которых численно равны одноименные критерии подобия.

Критерии и числа подобия – безразмерные комплексы, составленные из размерных физических величин, характерных для рассматриваемого процесса.

Критерии подобия формируются из заранее известных (определяющих) величин.

Числа подобия формируются из искоемых (определяемых) величин.

Критерии и числа подобия, используемые в задачах конвективного теплообмена

1. Число Нуссельта - безразмерный коэффициент теплоотдачи.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_0}{\lambda_f}$$

2. Критерий Рейнольдса характеризует подобие сил при вынужденном движении среды: соотношение между силами инерции и силами вязкости в потоке; определяет режим течения жидкости.

$$Re = \frac{w_0 \cdot l_0}{\nu_f}$$

3. Критерий Прандтля характеризует подобие свойств текучей среды (соотношение вязкостных и инерционных тепловых свойств

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

4. Критерий Грасгоффа - характеризует подобие сил при свободном движении неизотермического потока: соотношение между подъемной силой единицы объема, возникающей вследствие разности плотностей, и силой вязкости.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l_0^3}{\nu^2}$$

Критериальные уравнения, используемые в задачах конвективного теплообмена

Вынужденное течение внутри трубы круглого сечения

$$\overline{Nu}_d = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l$$

Свободное движение
у горизонтальной трубы:

$$Nu_d = 0,5 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad 10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$$

у вертикальной поверхности

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (Gr \cdot Pr) > 6 \cdot 10^{10}$$

Поперечное обтекание одиночной трубы:

$$\overline{Nu} = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$$

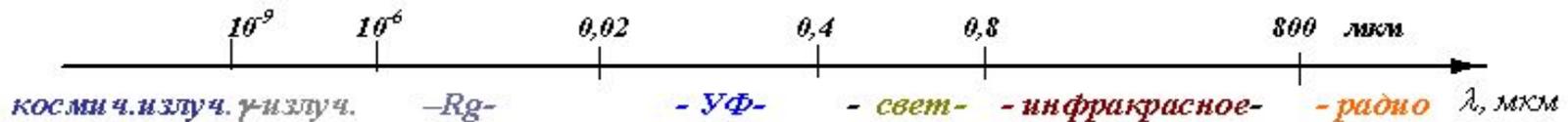
Излучение

Излучение - вид теплопередачи в пространстве, обусловленный переносом энергии с помощью электромагнитных волн.

Излучение

интегральное

монохроматическое



Поверхностная плотность потока *интегрального* излучения – отношение потока излучения к площади поверхности для всего диапазона длин волн.

$$E = \frac{\Phi}{F}, \frac{Вт}{м^2}$$

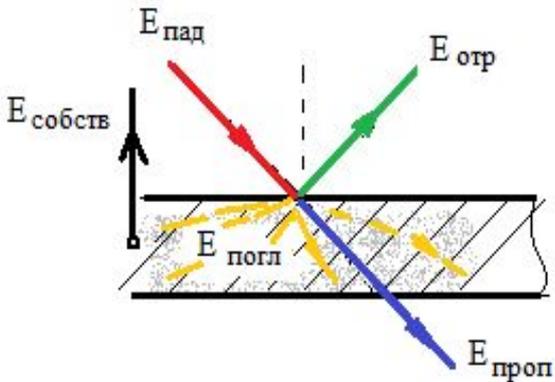
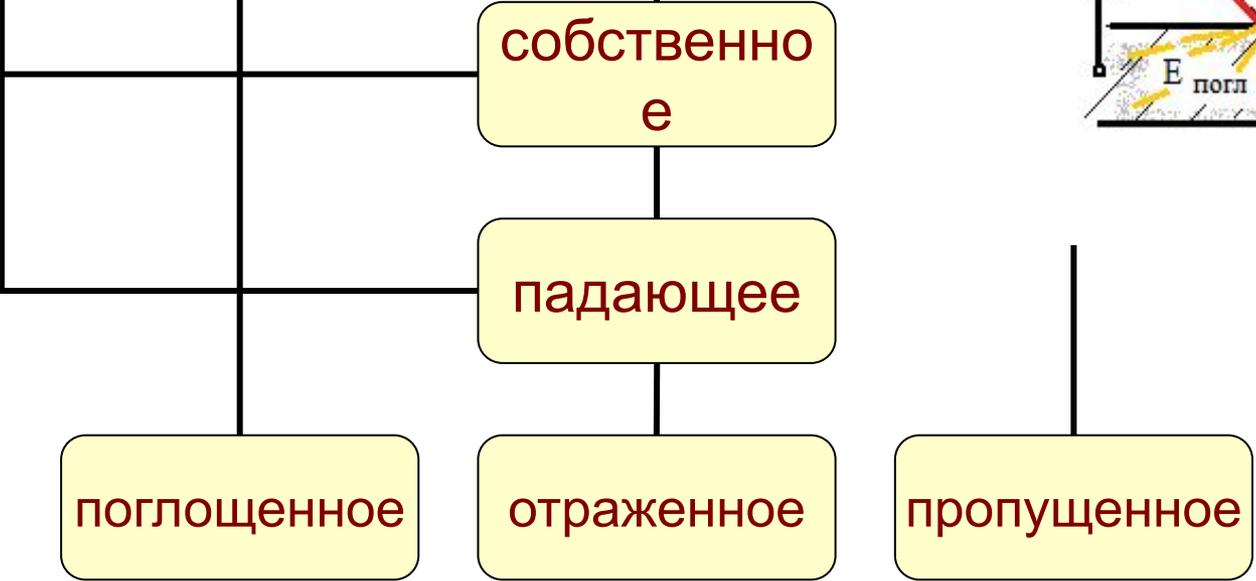
Поверхностная плотность потока *монохроматического* излучения - отношение потока излучения к площади поверхности и величине интервала длин волн.

$$E_{\lambda} = \frac{\Phi}{F \cdot \Delta \lambda}, \frac{Вт}{м^2}$$

Классификация потоков излучения

Лучистый теплообмен – это совместные процессы взаимного испускания, поглощения, отражения и пропускания электромагнитных волн между телами. Тела могут иметь *одинаковую температуру*.

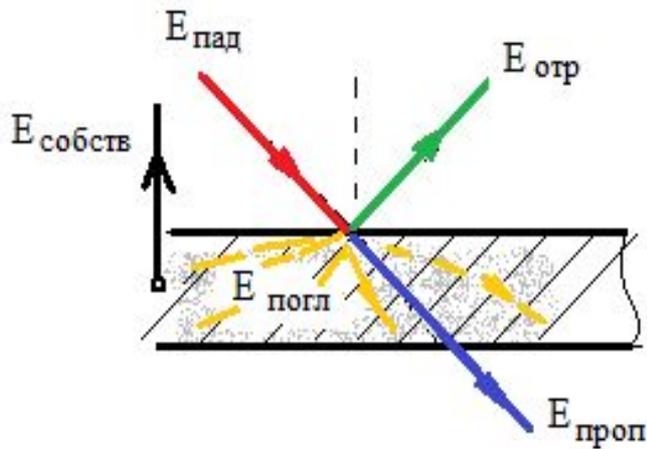
Излучение



$$E_{над} = E_{отр} + E_{погл} + E_{пропуск}$$

Классификация потоков излучения

$$E_{\text{пад}} = E_{\text{отр}} + E_{\text{погл}} + E_{\text{пропуск}}$$



$$\frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} = R \quad \text{- коэффициент отражения}$$

$$\frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}} = A \quad \text{- коэффициент поглощения}$$

$$\frac{E_{\text{проп}}}{E_{\text{пад}}} = D \quad \text{- коэффициент пропускания}$$

$$R + A + D = 1$$

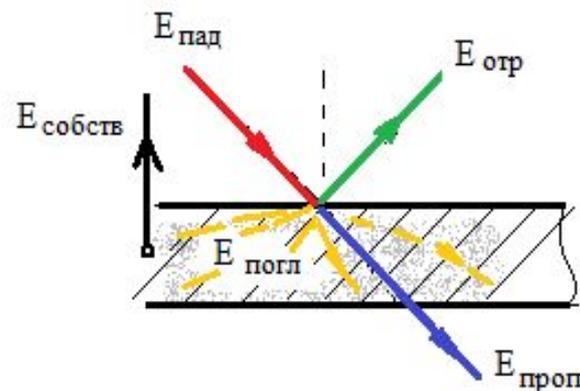
$$\frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} + \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}} + \frac{E_{\text{пропуск}}}{E_{\text{пад}}} = 1$$

Классификация потоков излучения

Излучение

эффективное

результатирующее



$$E_{эф} = E_{собст} + E_{отраж}$$

$$E_{рез} = E_{собст} - E_{погл}$$

Для термодинамического равновесия

$$E_{собст} = E_{погл}$$

Законы теплового излучения

Законы теплового излучения применимы к абсолютно черным телам, у которых поток падающего излучения равен поглощаемому потоку:

$$E_0 = E_{\text{над}} = E_{\text{погл}} \quad (A = 1)$$

и для термодинамического равновесия системы, когда $E_{\text{рез}} = 0$

$$\text{и} \quad E_{\text{собств}} = E_{\text{погл}} = E_{\text{над}}$$

Закон М. Планка

Закон М. Планка (1900 г.) устанавливает зависимость плотности потока собственного монохроматического излучения от длины волны и абсолютной температуры для абсолютно черного тела:

$$E_{\lambda} = f(\lambda, T)$$

$$E_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}$$

где $C_1 = h \cdot c^2 = 5,944 \cdot 10^{-17}$ Вт*м² 1-ая константа излучения

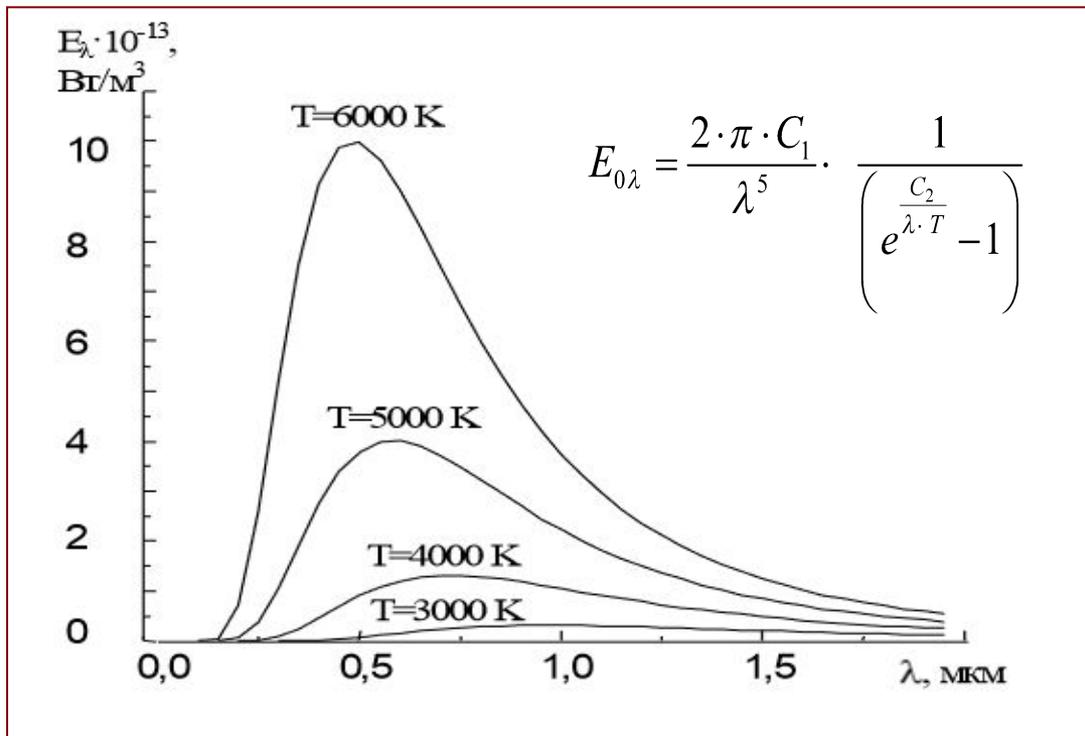
($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж*с-постоянная Планка);

$C_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 0,014388$, м.К - 2-ая константа излучения;

($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. – постоянная Больцмана)

$C_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с-скорость света в вакууме;

Физический смысл закона М. Планка



1. Каждой длине волны при постоянной температуре соответствует свое значение $E_{0\lambda}$
2. С повышением температуры плотность потока монохроматического излучения возрастает.
3. Спектральная плотность потока излучения имеет максимум на каждой температуре, соответствующий определенной длине волны.
4. Максимальная плотность потока излучения с повышением температуры смещается в сторону более коротких волн (закон смещения Вина).

Закон Стефана-Больцмана

устанавливает зависимость плотности потока собственного интегрального излучения абсолютно черного тела от абсолютной температуры и от физической природы (излучательной способности) тела.

Плотность потока интегрального излучения по всем направлениям пропорциональна 4-степени абсолютной температуры.

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4$$

$$\sigma_0 = 5,6703 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \quad - \text{ постоянная Стефана-Больцмана}$$

$$E_0 = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

где $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ - коэффициент интегрального излучения

Закон Стефана-Больцмана

Для системы из 2-х «серых» тел:

$$E = c_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

где
$$c_{np} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}}$$

- приведенный коэффициент интегрального излучения системы из 2-х «серых» тел

c_1 и c_2 – коэффициенты интегрального излучения 2-х «серых» тел.

$c_0 = 5,67 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$ - коэффициент интегрального излучения абсолютно черного тела

Теплообменные аппараты

- **Теплота** – способ передачи внутренней энергии; процесс необратимый, самопроизвольный.
- **Теплоноситель** – вещество, обладающее внутренней энергией и способное отдавать или воспринимать ее при взаимодействии с другим теплоносителем
- **Теплообменный аппарат** – устройство, предназначенное для передачи внутренней энергии в виде теплоты от одного теплоносителя к другому.

Классификация по принципу действия

Теплообменные аппараты

Контактные

● непосредственный контакт и смешение теплоносителей (градирни, деаэраторы, скрубберы)

Регенеративные

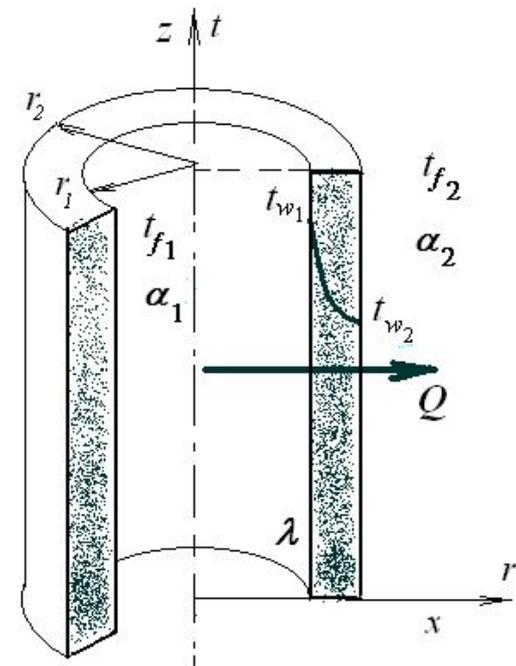
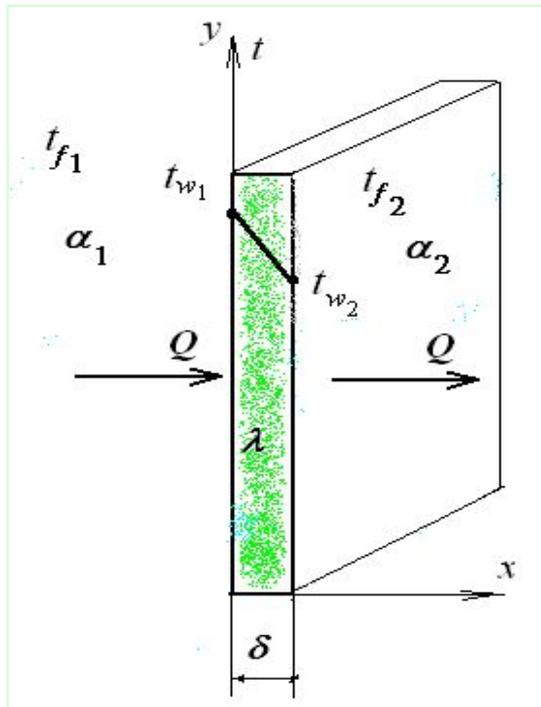
• периодический нагрев и охлаждение одной и той же поверхности (регенераторы, воздухонагреватели)

Рекуперативные

теплота передаётся через стенку, разделяющую горячий и «холодный» теплоносители при одновременном их протекании

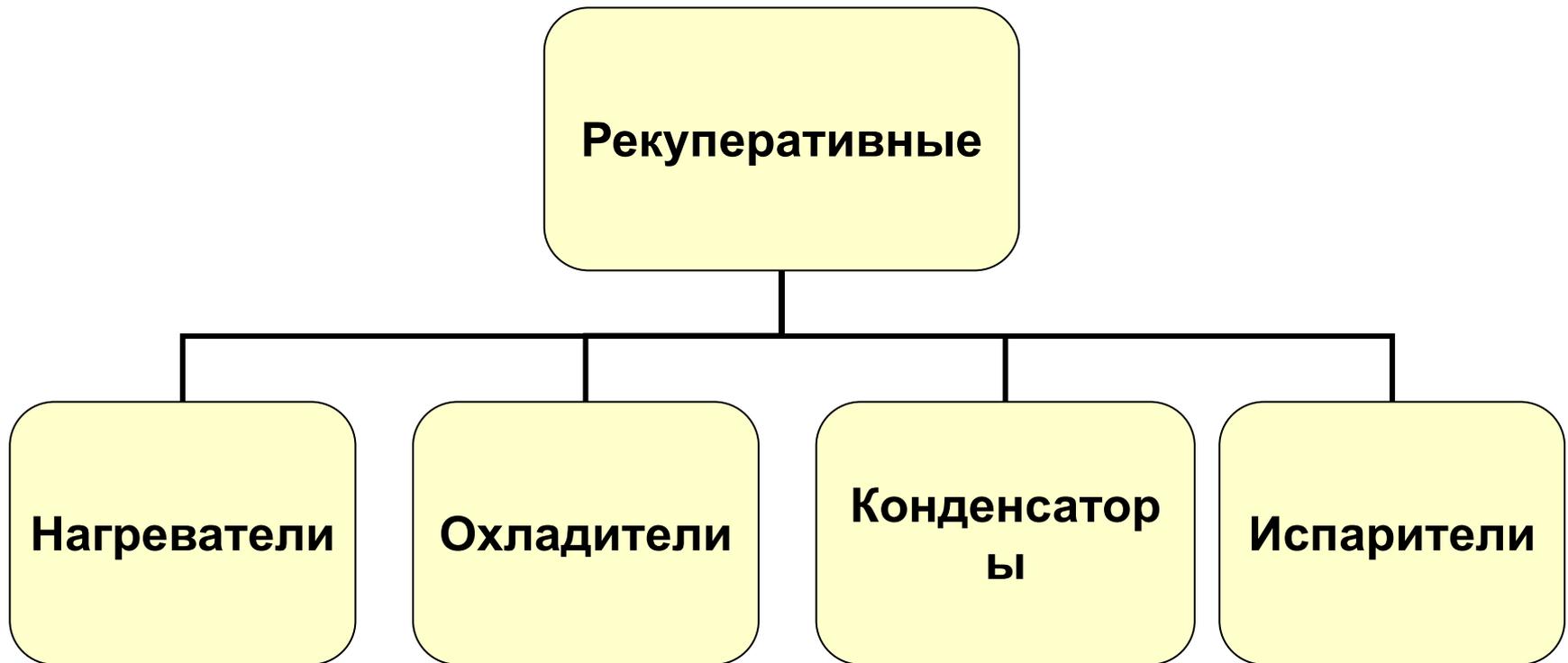
Теплообменные аппараты

В рекуперативных ТА теплота передаётся через стенку, разделяющую горячий и «холодный» «теплоносители»



Классификация по назначению

Теплообменные аппараты



Классификация по схеме течения

```
graph TD; A[Классификация по схеме течения] --- B[Прямоточная]; A --- C[Схемы течения]; A --- D[Перекрестная]; C --- E[Противоточная]; C --- D;
```

Схемы течения

Прямоточная

Противоточная

Перекрестная

Классификация РТА по виду поверхности

Рекуперативные ТА

Кожухотрубные

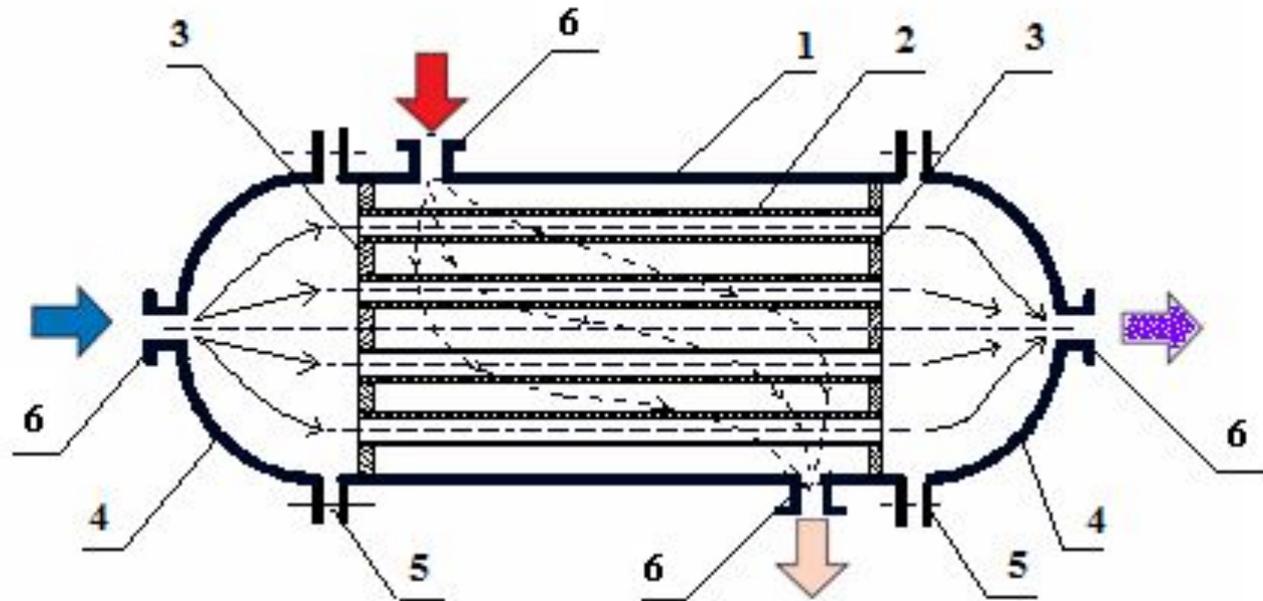
Трубчатые

Пластинчатые

Спиральные

Змеевиковые

Устройство кожухотрубного теплообменного аппарата



1 - Корпус; 2 - Трубный пучок; 3 –Трубные решетки;
4 –Крышки; 5-Элементы крепления; 6 – патрубки входа
и выхода теплоносителей.

Конструкторский расчет рекуперативных теплообменных аппаратов

Цель: определение необходимой площади поверхности для передачи заданного теплового потока.

Исходные данные:

- Тепловой поток (тепловая нагрузка), Q , Вт
- Температуры на входе t'_1 и t'_2
- Теплофизические свойства теплоносителей
- Температуры на выходе или массовые расходы теплоносителей : G_1 и G_2

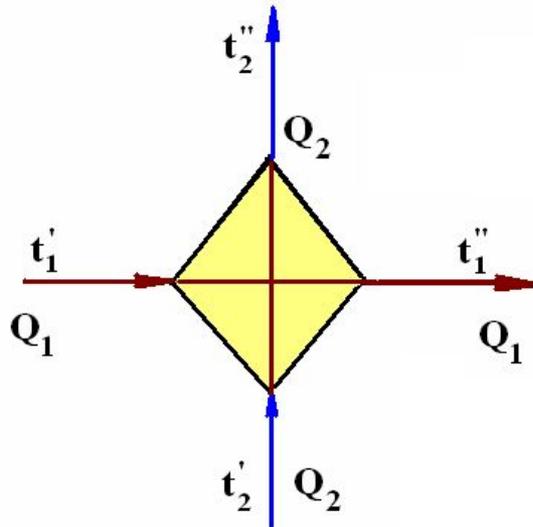
или

$$t''_1 \text{ и } t''_2$$

- Схема течения

Конструкторский расчет

В основе расчета – уравнение теплового баланса:



$$Q_1 = \Delta H_1 = \frac{m_1}{\tau} \cdot c_{p1} \cdot \Delta t_{f1}$$

$$Q_2 = \Delta H_2 = \frac{m_2}{\tau} \cdot c_{p2} \cdot \Delta t_{f2}$$

$$Q_1 = Q_2$$

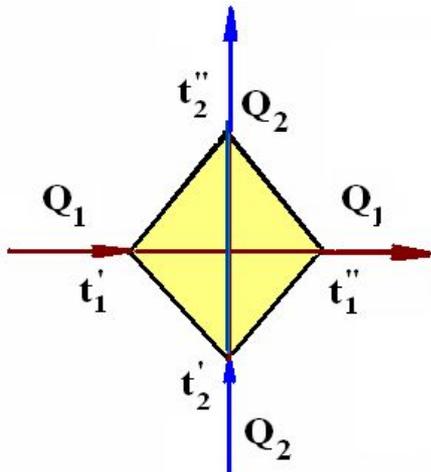
$$G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2')$$

и уравнение теплопередачи:

$$Q = \bar{k} \cdot \bar{\Delta t} \cdot F$$

Конструкторский расчет

Полная теплоемкость массового расхода



$$\tilde{N}_1 = G_1 \cdot c_{p1}$$

$$C_2 = G_2 \cdot c_{p2}$$

$$C_1 \cdot (t'_1 - t''_1) = C_2 \cdot (t''_2 - t'_2)$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{t''_2 - t'_2}{t'_1 - t''_1} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

Изменение температур теплоносителей в рекуперативном теплообменнике обратно пропорционально их полным расходным теплоемкостям

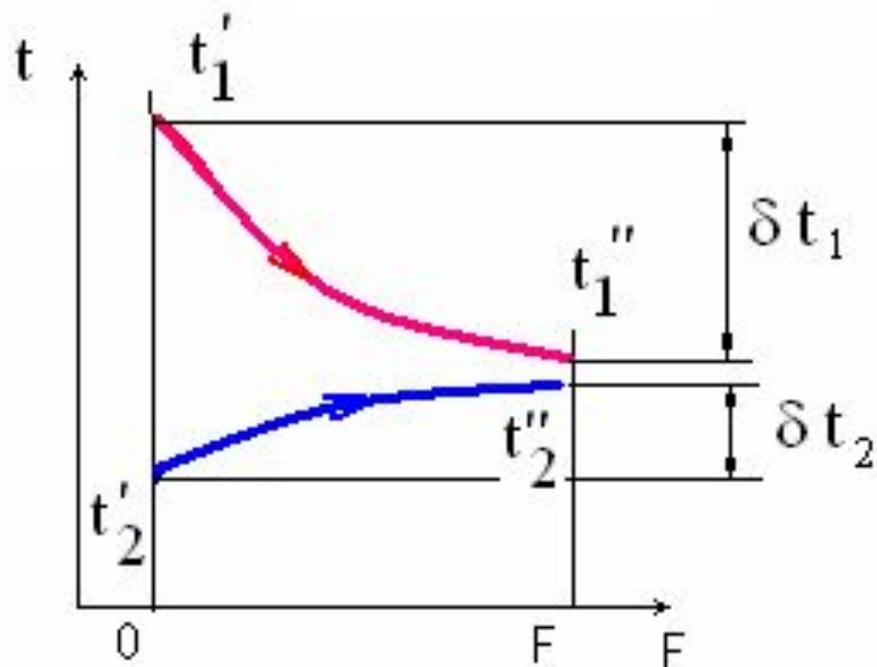
Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей
для прямоточной схемы

$$C_1 < C_2$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

$$\delta t_1 > \delta t_2$$



Всегда для прямоточной схемы

$$t_2'' < t_1''$$

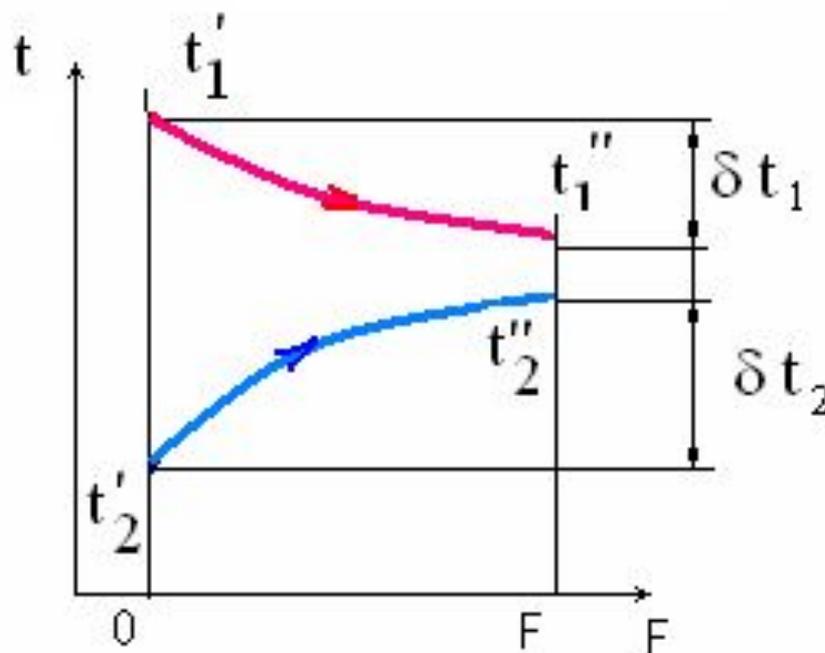
Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей
для прямоточной схемы

$$C_1 > C_2$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

$$\delta t_1 < \delta t_2$$

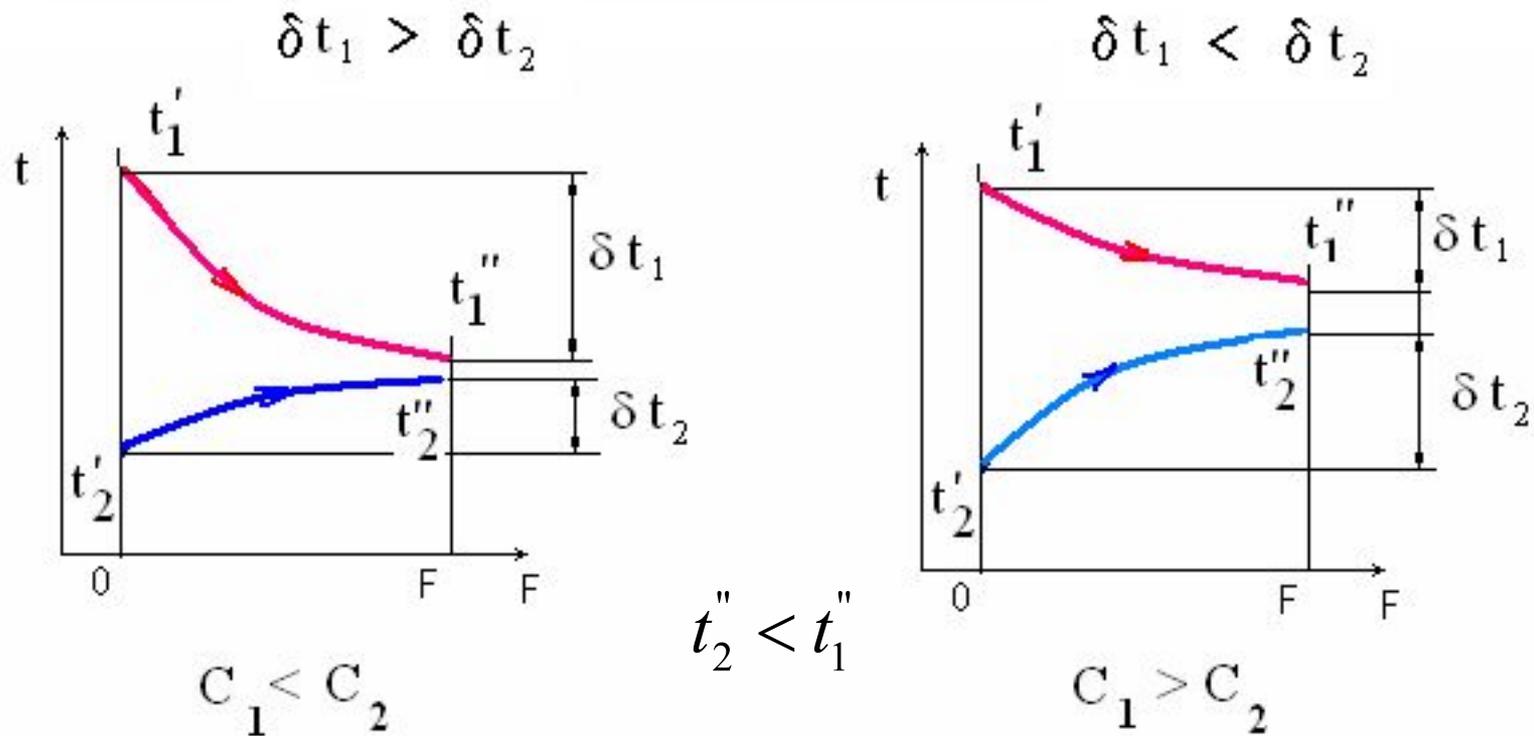


Всегда для прямоточной схемы

$$t_2'' < t_1''$$

Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей
для прямоточной схемы



Большее изменение температур имеет место для теплоносителя с меньшей расходной теплоемкостью!

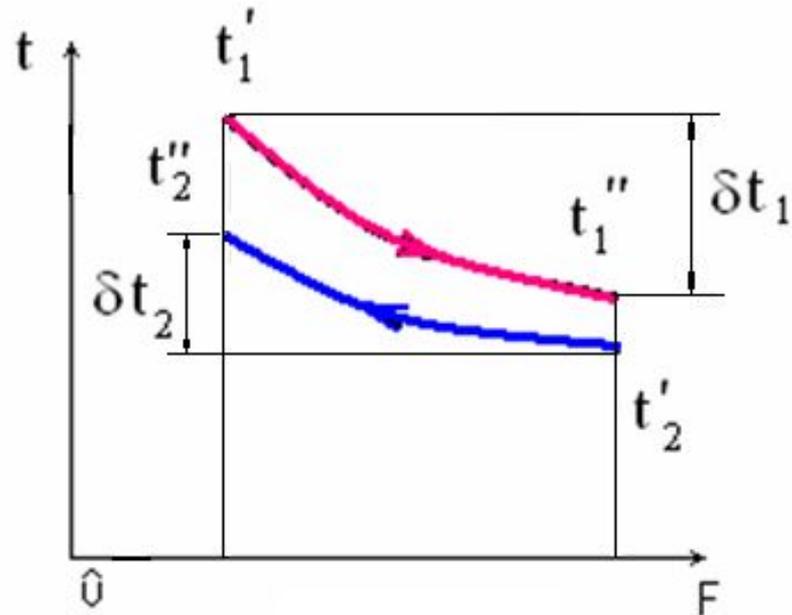
Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей
для противоточной схемы

$$C_1 < C_2$$

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

$$\delta t_1 > \delta t_2$$



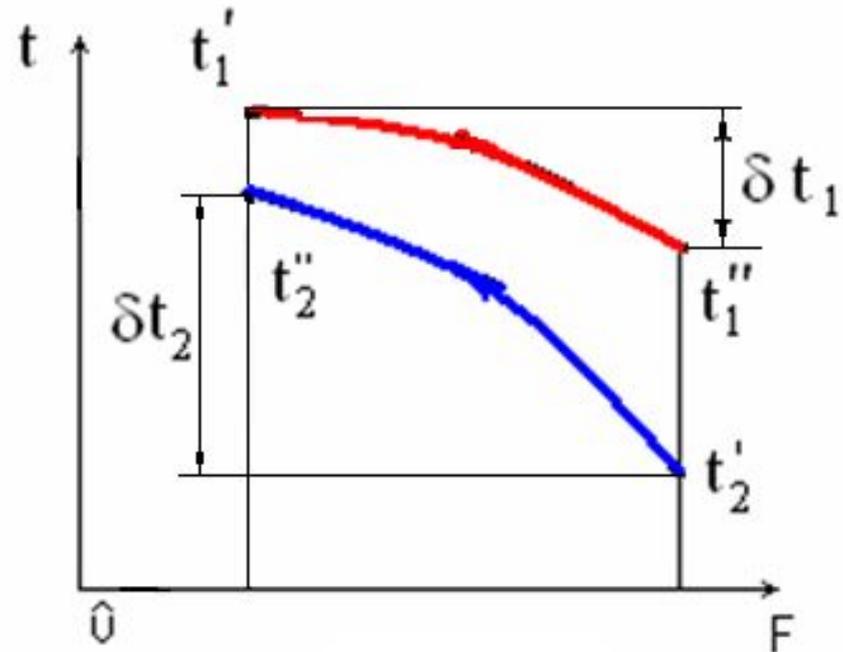
Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей
для противоточной схемы

$$C_1 > C_2$$

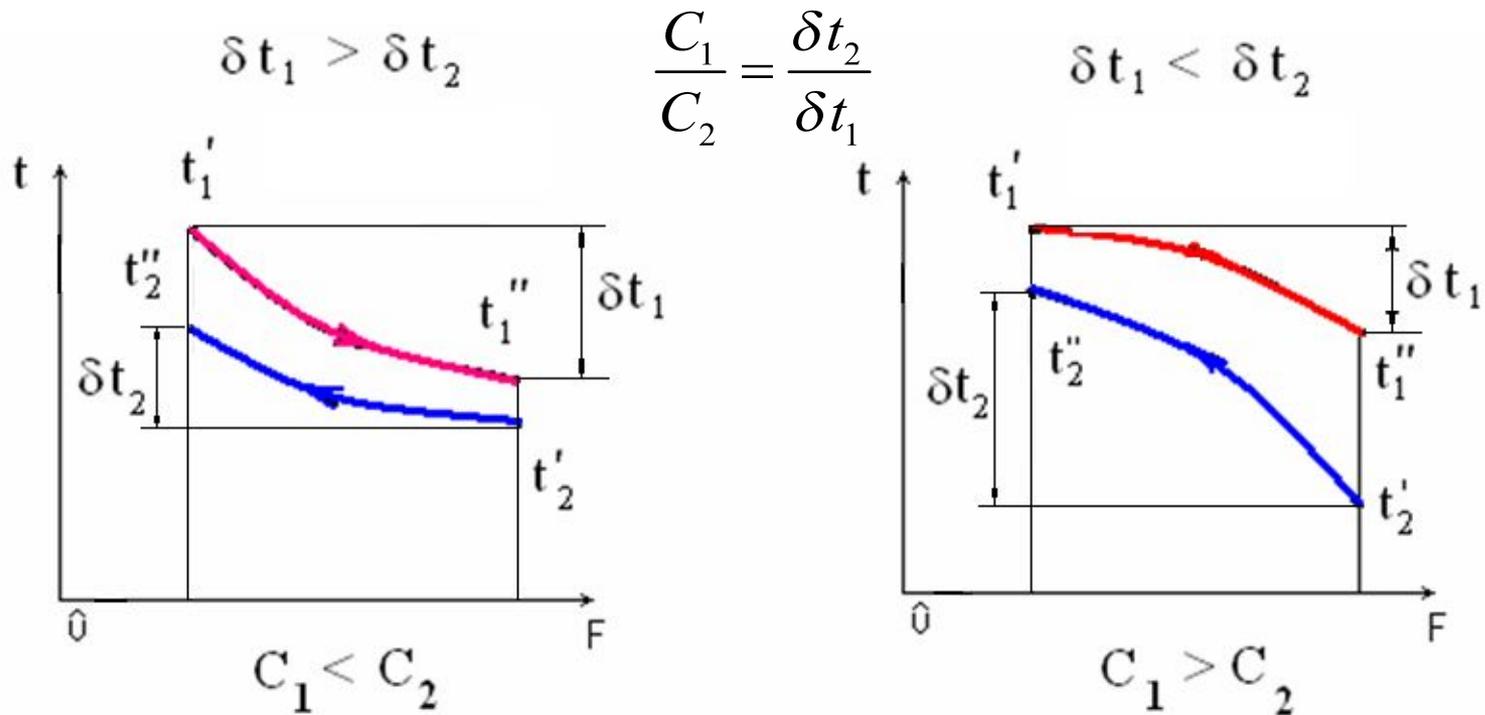
$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

$$\delta t_1 < \delta t_2$$



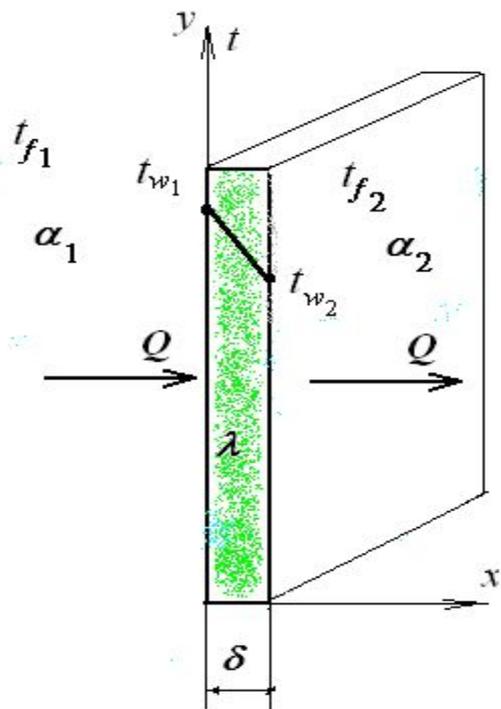
Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей для противоточной
СХЕМЫ

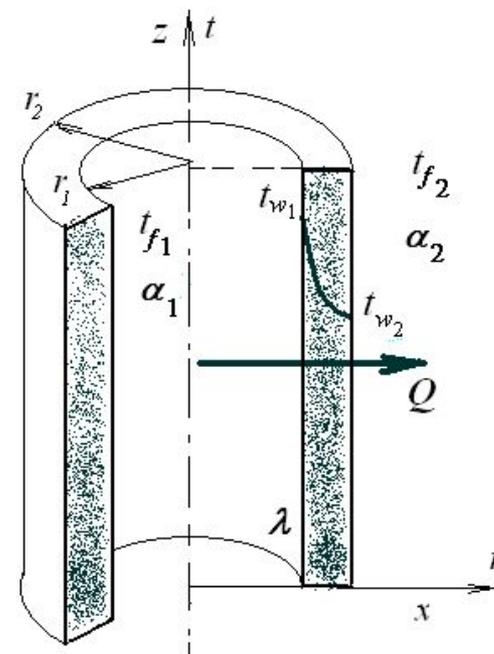


Большее изменение температур имеет место для теплоносителя с меньшей расходной теплоемкостью!

Уравнение теплопередачи



$$dQ = k \cdot (t_2 - t_1) \cdot dF$$



В рекуперативных ТА теплота передаётся через стенку, разделяющую горячий и «холодный» теплоносители»

Уравнение теплопередачи

$$dQ = k \cdot (t_2 - t_1) \cdot dF \quad - \text{ для элемента поверхности}$$

$$Q = \int_0^F k \cdot \Delta t \cdot dF \quad - \text{ для всей поверхности}$$

$$Q = \bar{k} \cdot \bar{\Delta t} \cdot F$$

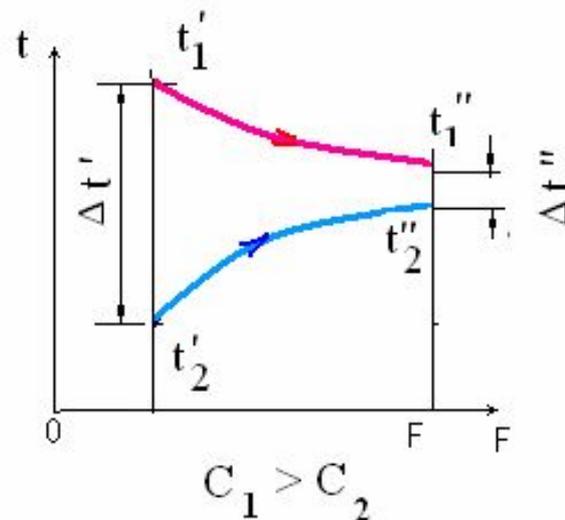
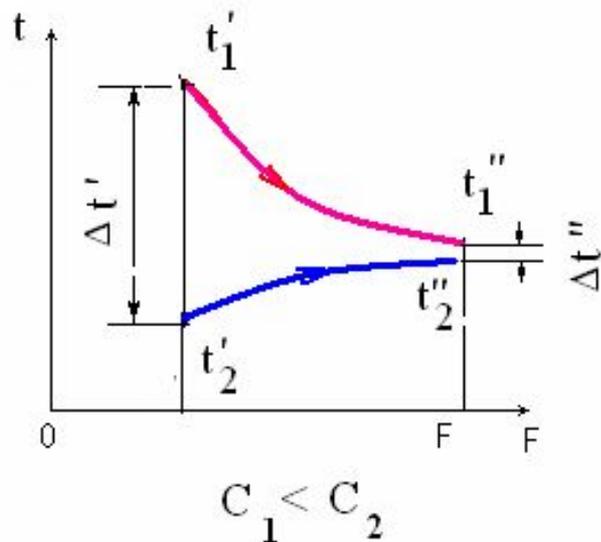
$$F = \frac{Q}{\bar{k} \cdot \bar{\Delta t}} \quad - \text{ площадь теплопередающей поверхности}$$

где \bar{k} - средний коэффициент теплопередачи всей поверхности

$$\bar{\Delta t} = \frac{1}{F} \cdot \int_0^F \Delta t \cdot dF \quad - \text{ средний температурный напор}$$

Определение среднего температурного напора аналитическим путем

Закон изменения температурного напора для прямоточной схемы



$$\ln \frac{\Delta t}{\Delta t'} = -m \cdot k \cdot F \quad \text{или}$$

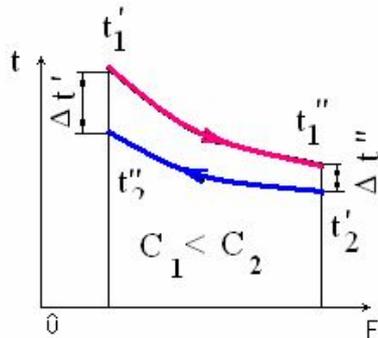
$$\Delta t = \Delta t' \cdot e^{-m \cdot k \cdot F}$$

Температурный напор уменьшается вдоль поверхности теплообмена независимо от соотношения полных теплоемкостей по экспоненциальному закону.

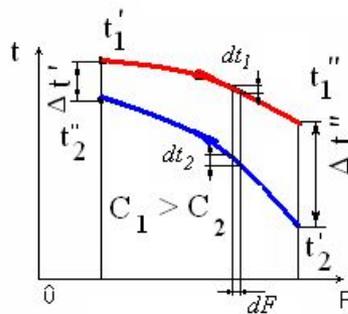
Определение среднего температурного напора аналитическим путем

Закон изменения температурного напора для противоточной схемы

$$\Delta t = \Delta t' \cdot e^{-m \cdot k \cdot F}$$



При $C_1 < C_2$ ($m > 0$) температурный напор **уменьшается** вдоль поверхности теплообмена по экспоненциальному закону.



При $C_1 > C_2$ ($m < 0$) температурный напор **увеличивается!** вдоль поверхности теплообмена по экспоненциальному закону.

Средний логарифмический температурный напор

При осреднении для всей поверхности:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}}$$

Для прямотока

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$$

Для противотока