

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

# Теплотехника»

**Часть 3.  
Основы теплопередачи**

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

**Ярославль, 2014-2016**

# Дисциплина «Теплопередача»

## 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;

**1. Температурное поле** – совокупность значений температур в каждой точке тела (или среды) в каждый момент времени.

**1. Изотермическая поверхность** – совокупность значений одинаковых температур в неоднородном **3-х мерном** температурном поле.

**1. Изотерма** – линия, получаемая при сечении изотермической поверхности плоскостью.

**5 Перепад температур  $\Delta t$**  – разность температур между двумя изотермическими поверхностями (линиями), поверхностью и окружающей средой.

**6. Градиент температуры** - отношение температурного перепада  $\Delta t$  между двумя изотермами к расстоянию между ними по нормали  $\Delta n$  .

# Основные понятия теории теплопередачи

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

.

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

## Основные понятия теории теплопередачи

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

**Плотность (поверхностная)** теплового потока – тепловой поток, отнесенный к единице площади теплопередающей поверхности, Вт/м<sup>2</sup>; является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону уменьшения температуры противоположно  $\text{grad } t$ :

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

## **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) :**

$$\text{Вт/м}^2.$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности.

## Коэффициент теплопроводности

<b>Вещества</b>	Коэффициент теплопроводности	<b>Особенности</b>
Газы	<b>0,005-0,6</b>	с увеличением температуры увеличивается.
Воздух	<b>0,025</b>	
Жидкости	<b>0,065-0,70</b>	с увеличением температуры уменьшается за исключением воды и глицерина.
Вода	<b>0,65</b>	
Теплоизоляционные материалы	<b>0,04-3,0</b>	с увеличением температуры увеличивается.
Металлы	<b>20-419</b>	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:

где  $a$ -коэффициент теплоотдачи;

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

**Примерные значения коэффициентов теплоотдачи  
 $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>К)  
для характерных случаев теплоотдачи**

<b>Режим течения</b>	<b><math>\alpha</math></b>
<b>Свободная конвекция газов</b>	<b>5 ÷ 50</b>
<b>Вынужденная конвекция газов.</b>	<b>30 ÷ 500</b>
<b>Свободная конвекция воды</b>	<b>100 ÷ 1000</b>
<b>Вынужденная конвекция воды</b>	<b>500 ÷ 30000</b>
<b>Кипение воды</b>	<b>2000 ÷ 40000</b>
<b>Пленочная конденсация водяного пара</b>	<b>4000-15000</b>

# Стационарная теплопередача через плоскую стенку

Плотность теплового потока

где

- термические сопротивления

- полное  
термическое  
сопротивление

# Стационарная теплопередача через плоскую неоднородную стенку

Плотность теплового потока

где

- суммарное термическое сопротивление многослойной стенки

**Температуры поверхностей и на границах слоев :**

где  $n$  – количество слоев



# Стационарная теплопередача через цилиндрическую стенку

Линейная плотность теплового потока

где

-полное  
сопротивление

линейное

термическое

# Стационарная теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку

Линейная плотность теплового потока

где

-суммарное      линейное      термическое  
сопротивление

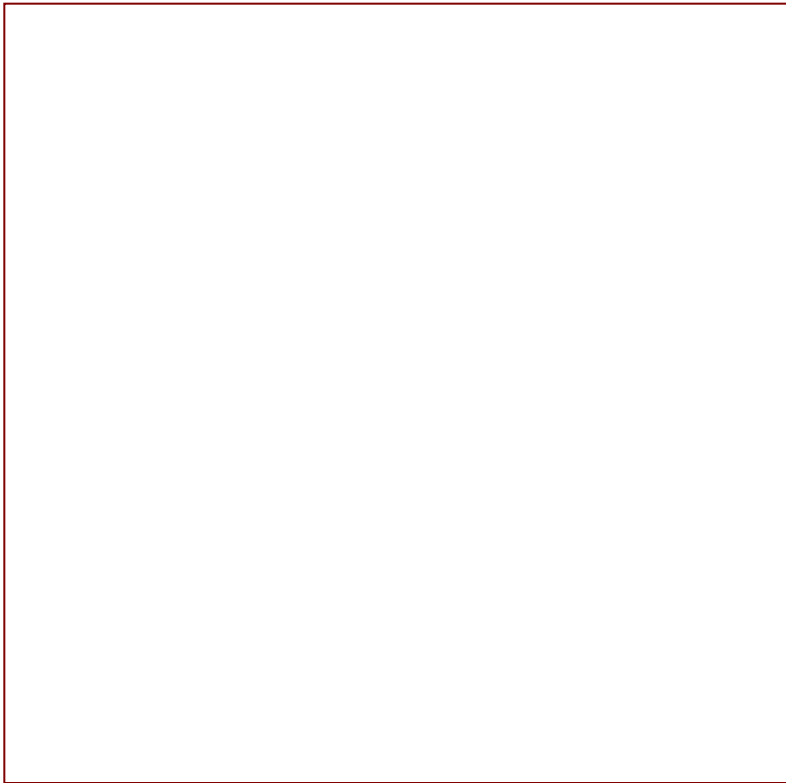
**Температуры поверхностей и на границах слоев :**



## 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.



## 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 искомых (определяемых) величин.

# Критерии и числа подобия, используемые в задачах конвективного теплообмена

**1. Число Нуссельта** - безразмерный коэффициент теплоотдачи.

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

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

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

# **Критериальные уравнения, используемые в задачах конвективного теплообмена**

**Вынужденное течение внутри трубы круглого сечения**

**Свободное движение**  
у горизонтальной трубы:

у вертикальной поверхности

**Поперечное обтекание одиночной трубы:**

# Излучение

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

Излучение

интегральное

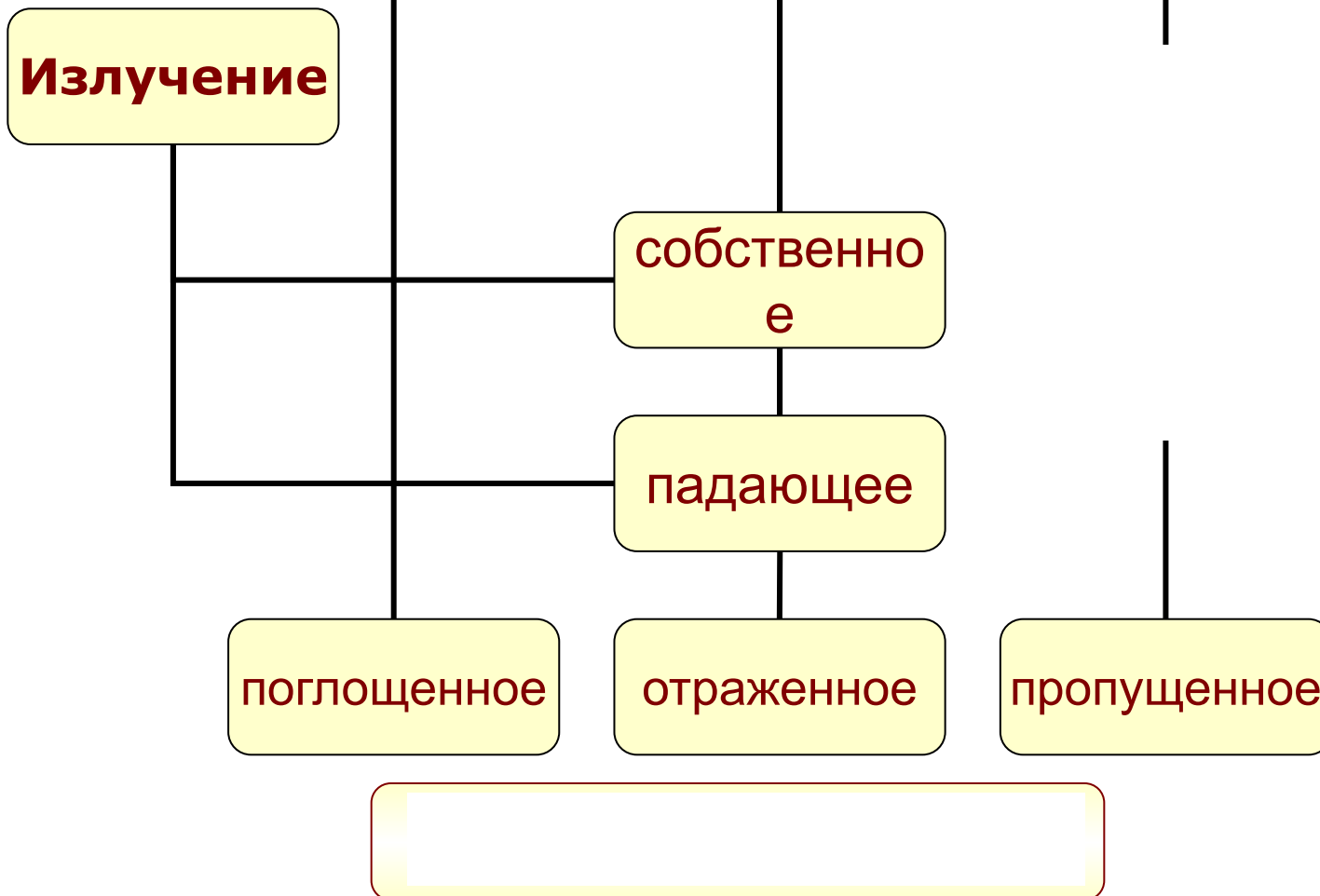
монохроматическое

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

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

## Классификация потоков излучения

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



# Классификация потоков излучения



- коэффициент отражения

- коэффициент поглощения

- коэффициент пропускания



# Классификация потоков излучения

**Излучение**

**эффективное**

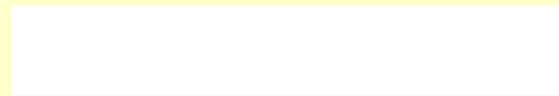
**результатирующее**

Для термодинамического равновесия

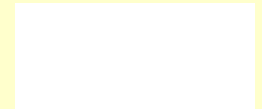


## Законы теплового излучения

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



и для термодинамического равновесия системы, когда



и



## 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:



где  $W_{\lambda}$  Вт\*м<sup>2</sup> 1-ая константа излучения

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

$T$ , 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

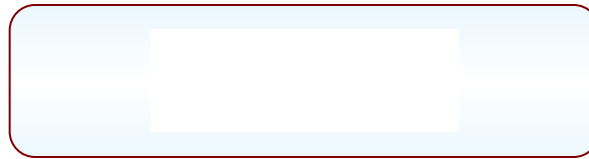


1. Каждой длине волны при постоянной температуре соответствует свое значение
2. С повышением температуры плотность потока монохроматического излучения возрастает.
3. Спектральная плотность потока излучения имеет максимум на каждой температуре, соответствующий определенной длине волны.
4. Максимальная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

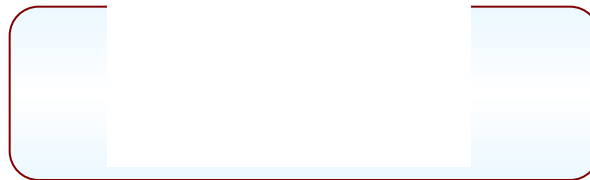
# Закон Стефана-Больцмана

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.



- постоянная Стефана-Больцмана



где

- коэффициент интегрального излучения

## Закон Стефана-Больцмана

Для системы из 2-х «серых» тел:

где

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

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

- 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

Рекуперативные

Нагреватели

Охладители

Конденсатор  
ы

Испарители

# Классификация по схеме течения

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
- Теплофизические свойства теплоносителей
- Температуры на выходе или массовые расходы теплоносителей :  $G_1$  и  $G_2$   
или

- Схема течения

# Конструкторский расчет

**В основе расчета – уравнение теплового баланса:**

**и уравнение теплопередачи:**

# Конструкторский расчет

## Полная теплоемкость массового расхода

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

## Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей  
для прямоточной схемы

Всегда для прямоточной схемы



## Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей  
для прямоточной схемы

Всегда для прямоточной схемы

# 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

## Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей  
для противоточной схемы

# Конструкторский расчет

Изменение температур теплоносителей для противоточной  
схемы

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

# Уравнение теплопередачи

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

# Уравнение теплопередачи

- для элемента поверхности

- для всей поверхности

- площадь теплопередающей поверхности

где - средний коэффициент теплопередачи всей поверхности

- средний температурный напор

## Определение среднего температурного напора аналитическим путем

Закон изменения температурного напора для прямоточной схемы

или  
:



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

При  $C1 < C2$  ( $m > 0$ ) температурный напор **уменьшается** вдоль поверхности теплообмена по экспоненциальному закону.

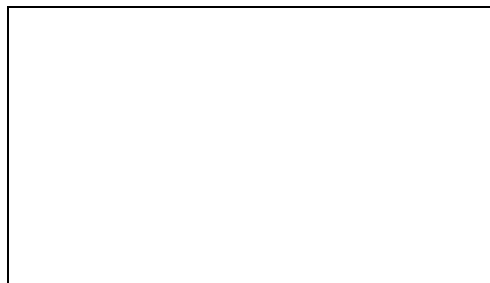
При  $C1 > C2$  ( $m < 0$ ) температурный напор **увеличивается!** вдоль поверхности теплообмена по экспоненциальному закону.

## Средний логарифмический температурный напор

При осреднении для всей  
поверхности:



Для прямотока



Для  
противотока