



Кафедра ЮНЕСКО “Энергосбережение и возобновляемые источники энергии”

# ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

*Лекция 1. Основные понятия и определения*

Г.И.Пальчёнок

# Теплопередача + Техническая Термодинамика =

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ,

позволяющие рассчитывать, разрабатывать и оптимизировать оборудование для производства и использования тепловой и электрической энергии в энергетике, промышленности, строительстве, быту и везде, везде, везде...

## Основная литература

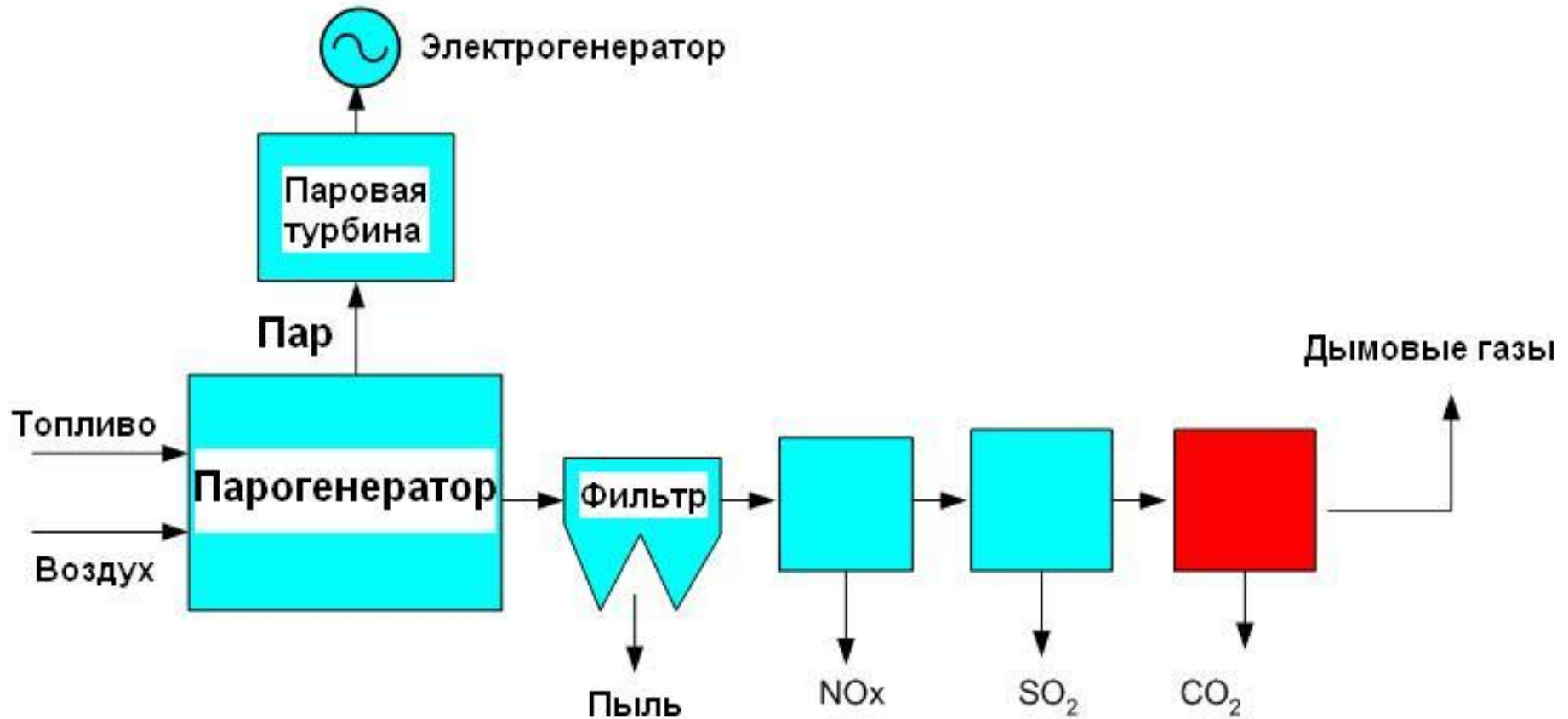
1. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен / Под ред. Э.И. Гуйго. М.: Агропромиздат, 1986. 320 с.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1981. 417 с.
3. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Теплообмен: учебное пособие для вузов / М.: Издательство МЭИ, 2001. 550 с.
6. Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В., Величко В.И.. Задачник по теплообмену: учебное пособие. М.: Изд.дом МЭИ, 2008. 196 с.
6. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. М.: Энергия, 1975. 288 с.

## **Дополнительная литература**

1. Практикум по теплопередаче: учебное пособие для вузов/Под ред. А.П. Солодова.- М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
2. Михеев М. А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. –343 с.
3. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.
4. Авчухов В.В., Паюсте Б.Я. Задачник по процессам тепломассообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 140 с.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 367 с.
6. Дульчев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Дульчев Г.Н. и др. – М.: Высшая школа, 1990. – 206 с.
7. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 212 с.
8. Данилова Г.Н. и др. Теплообменные аппараты холодильных установок. – Л.: Машиностроение, 1986. – 302 с.
9. Барановский Н.В. Пластинчатые и спиральные теплообменники. – М.: Машиностроение, 1973. 288 с.
10. Копко В.М., Пшоник М.Г. Пластинчатые теплообменники в системах централизованного теплоснабжения. Курсовое и дипломное проектирование: учебное пособие. – Мн.: БНТУ, 2005. – 199 с.
11. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1991. – 588 с.
12. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
13. Богданов С.Н. и др. Холодильная техника. Свойства веществ. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1985. – 208 с.

**90% энергии в мире производится путем сжигания органического (ископаемого и био-) топлива.**

**Паротурбинная энергетическая установка (ПТУ) – традиционное оборудование ТЭС (КПД до 40%)**



# Прототип энергетического котельного агрегата (парогенератора) – самовар

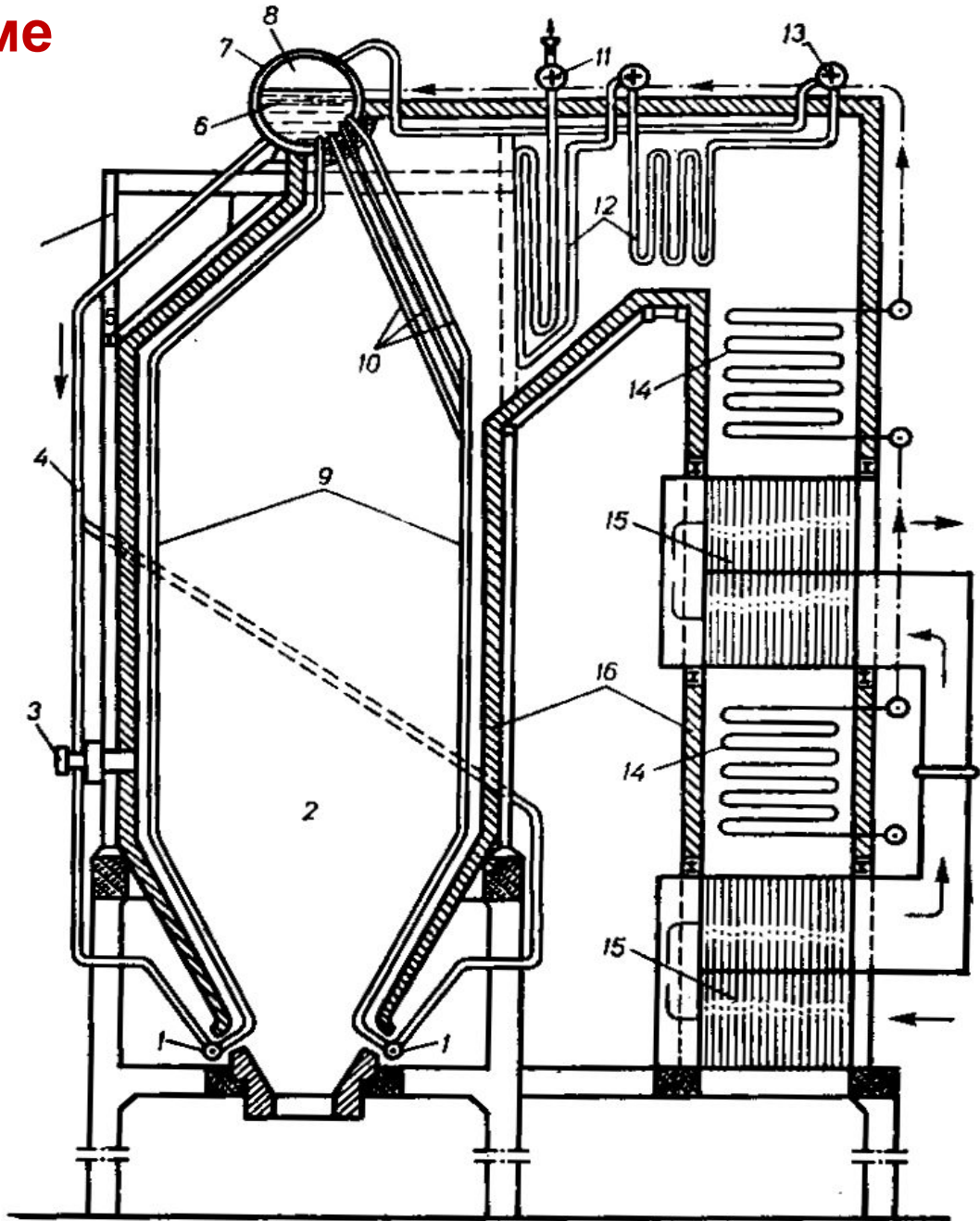
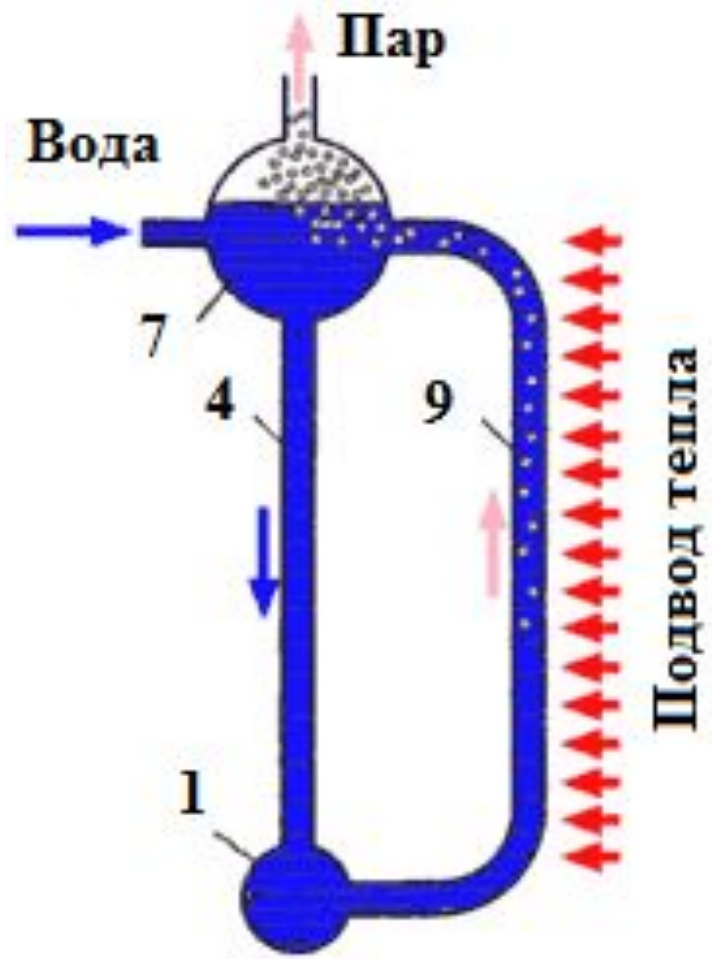


Внутри расположена жаровня в виде трубы - "кувшин". Внизу под "кувшином" для усиления тяги делается поддувало.



Преимуществом самовара явилось то, что в нем жаровая труба помещена внутри резервуара и окружена со всех сторон водой, что снижает тепловые потери из топки-жаровни.

**КОТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ – устройство для производства тепловой энергии в форме водяного пара / горячей воды за счет теплоты сгорания топлива**



# Теплообменные поверхности (поверхности нагрева) котельного агрегата

## Испарительные настенные экраны

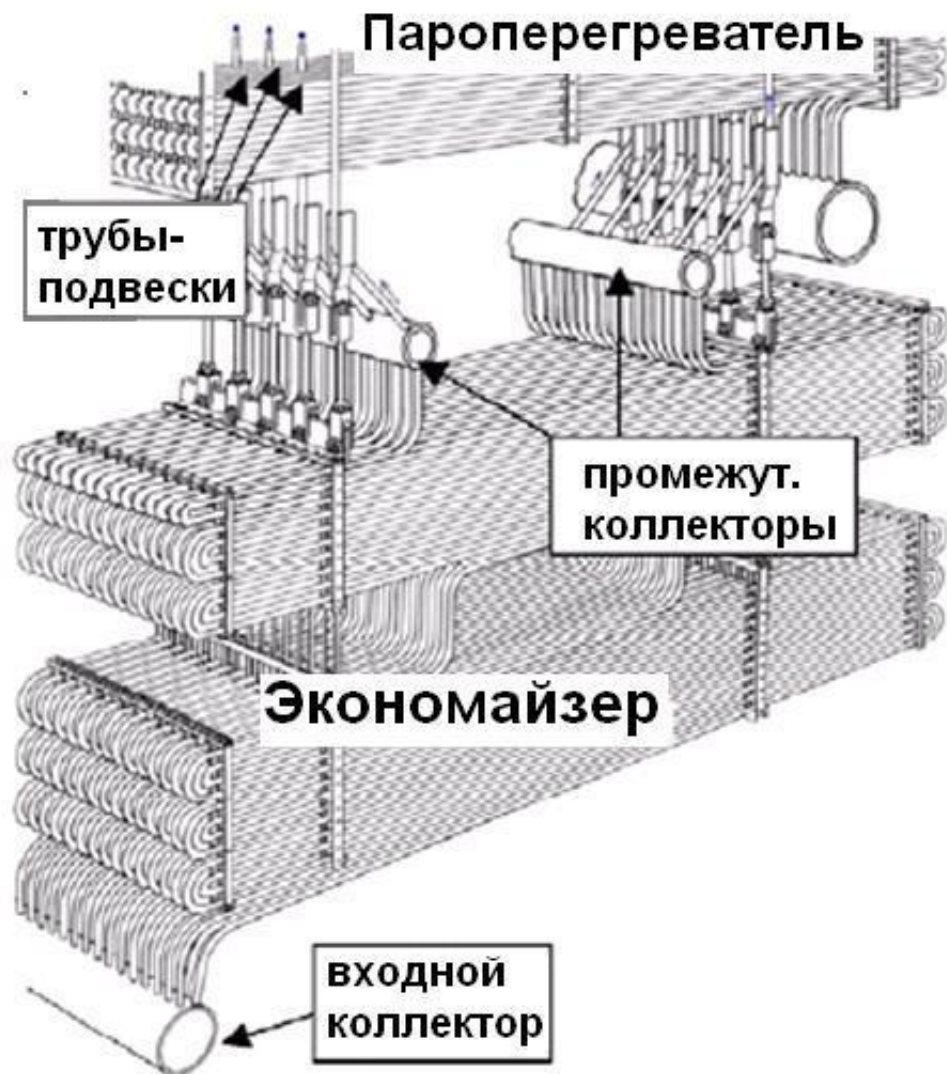
Тепловое излучение от факела горящего топлива



Мембранная стенка  
плавник

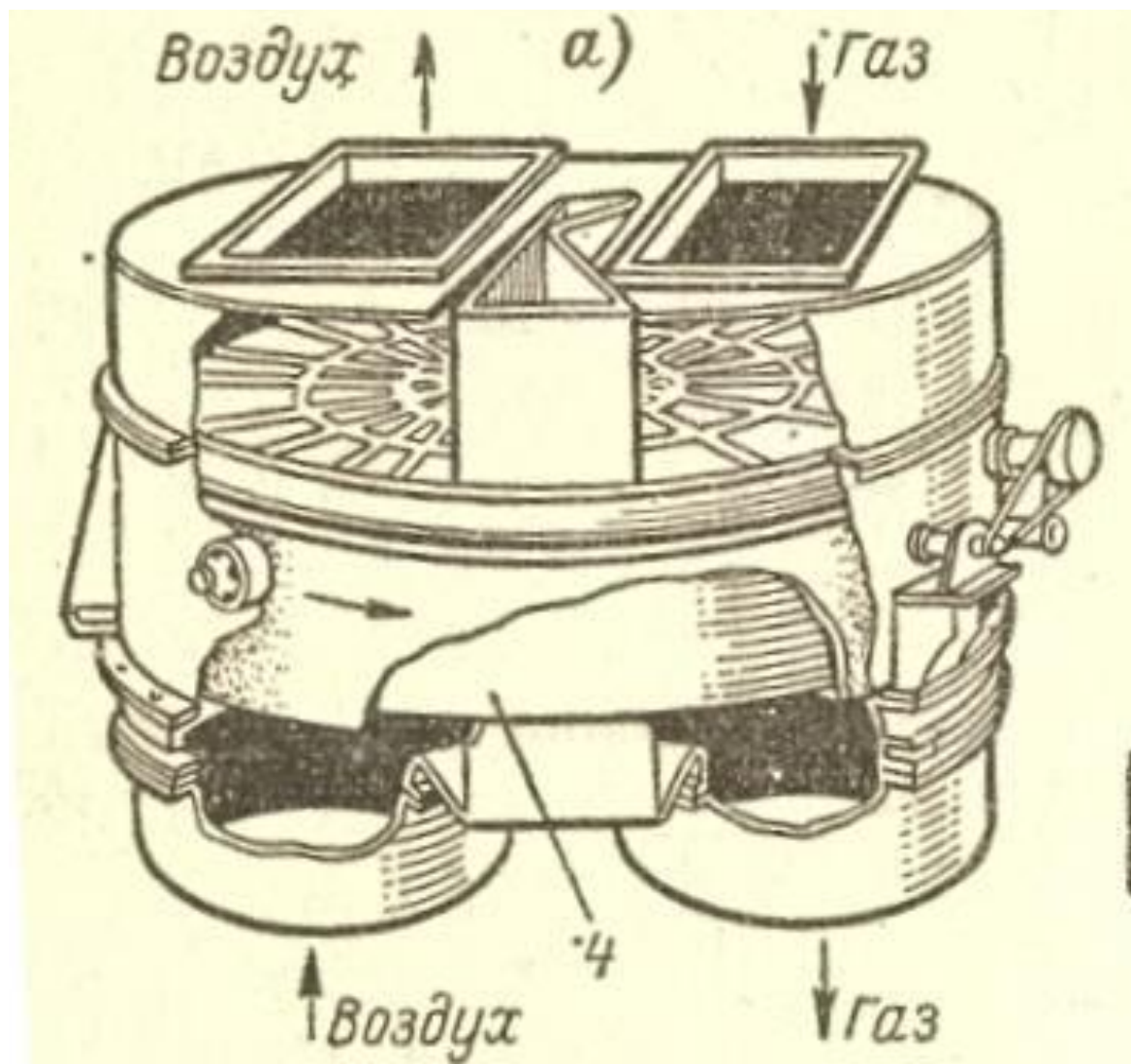


## Конвективные трубные пучки

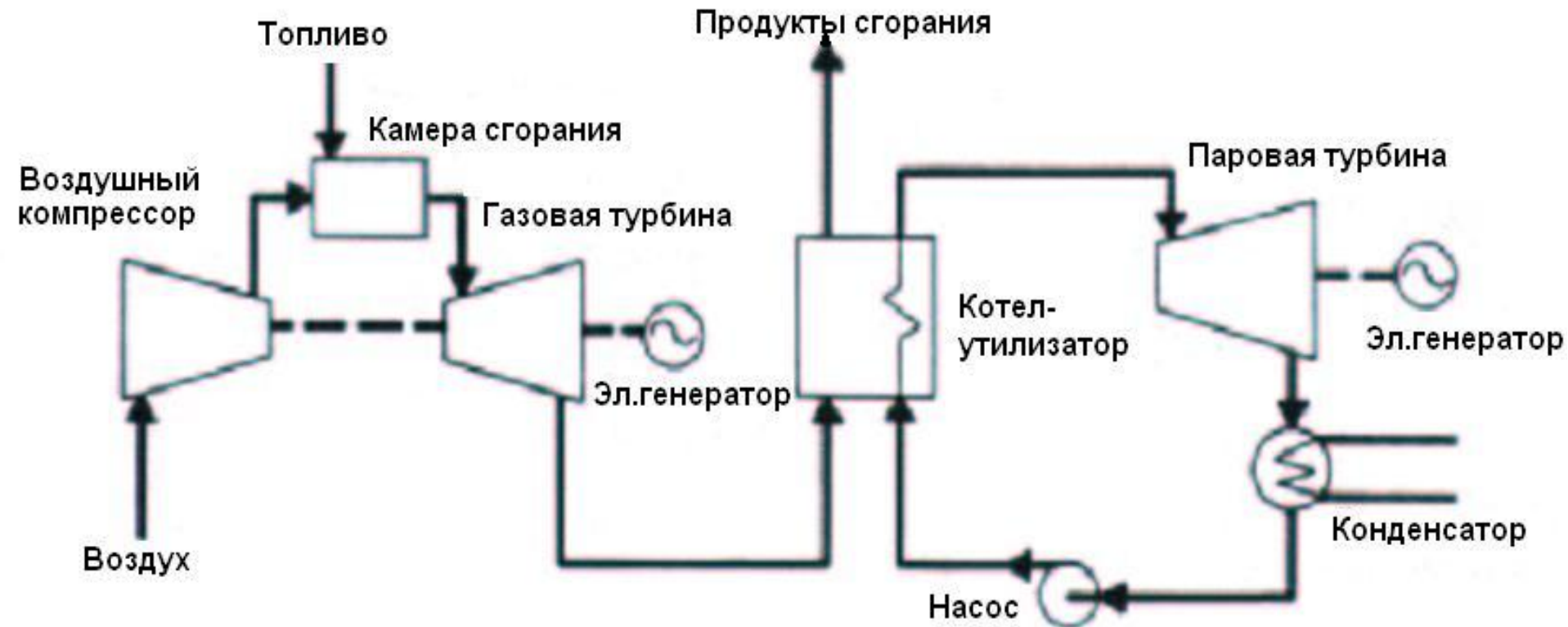




**Регенеративный теплообменник – воздухоподогреватель  
для утилизации теплоты уходящих дымовых газов с  
целью подогрева воздуха, используемого для сжигания  
топлива в котле**



# Энергетическая парогазовая установка (ПГУ) – наиболее эффективное на сегодняшний день энергетическое оборудование (КПД до 60%)



# Градирня – контактный теплообменник системы оборотного водоснабжения ПТУ

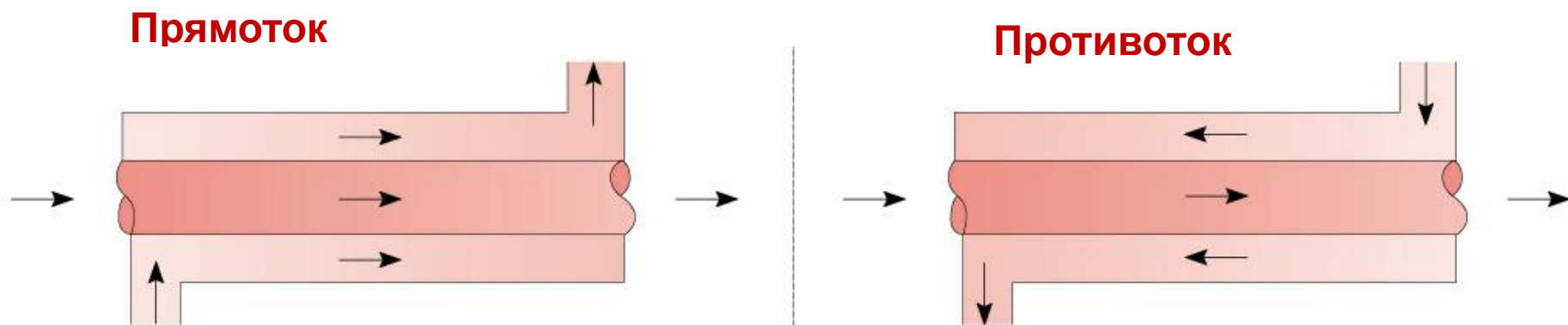


Техническая вода, использованная для конденсации пара на выходе из паровой турбины, охлаждается в градирне, стекая по внутренним стенкам башни, за счет испарения при контакте с восходящим потоком воздуха.

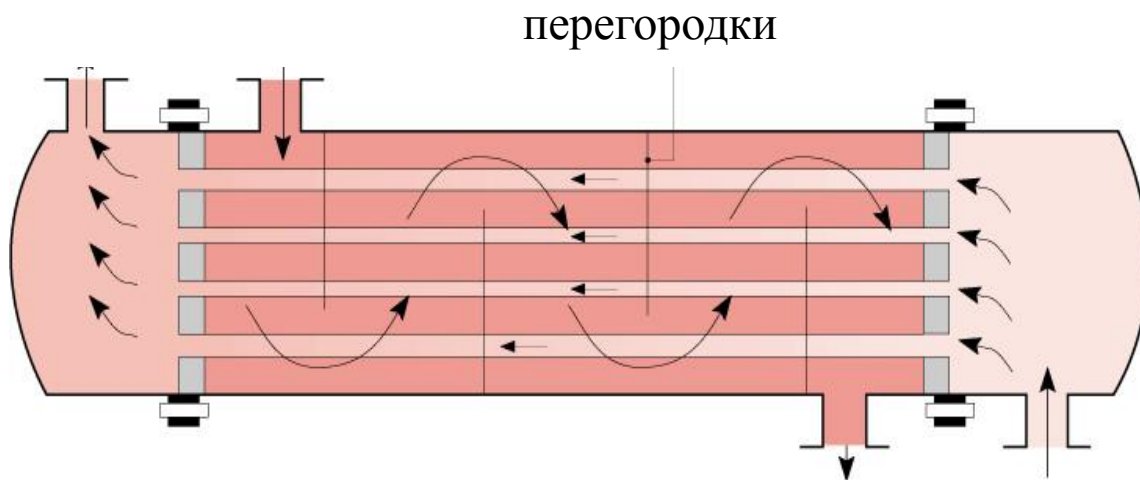
**1% испарённой воды => охлаждение на 6 °С**

**Горячая вода или пар из котла или отбора турбины используются для отопления и горячего водоснабжения жилья и предприятий, где установлены "бойлеры" – промежуточные теплообменники.**

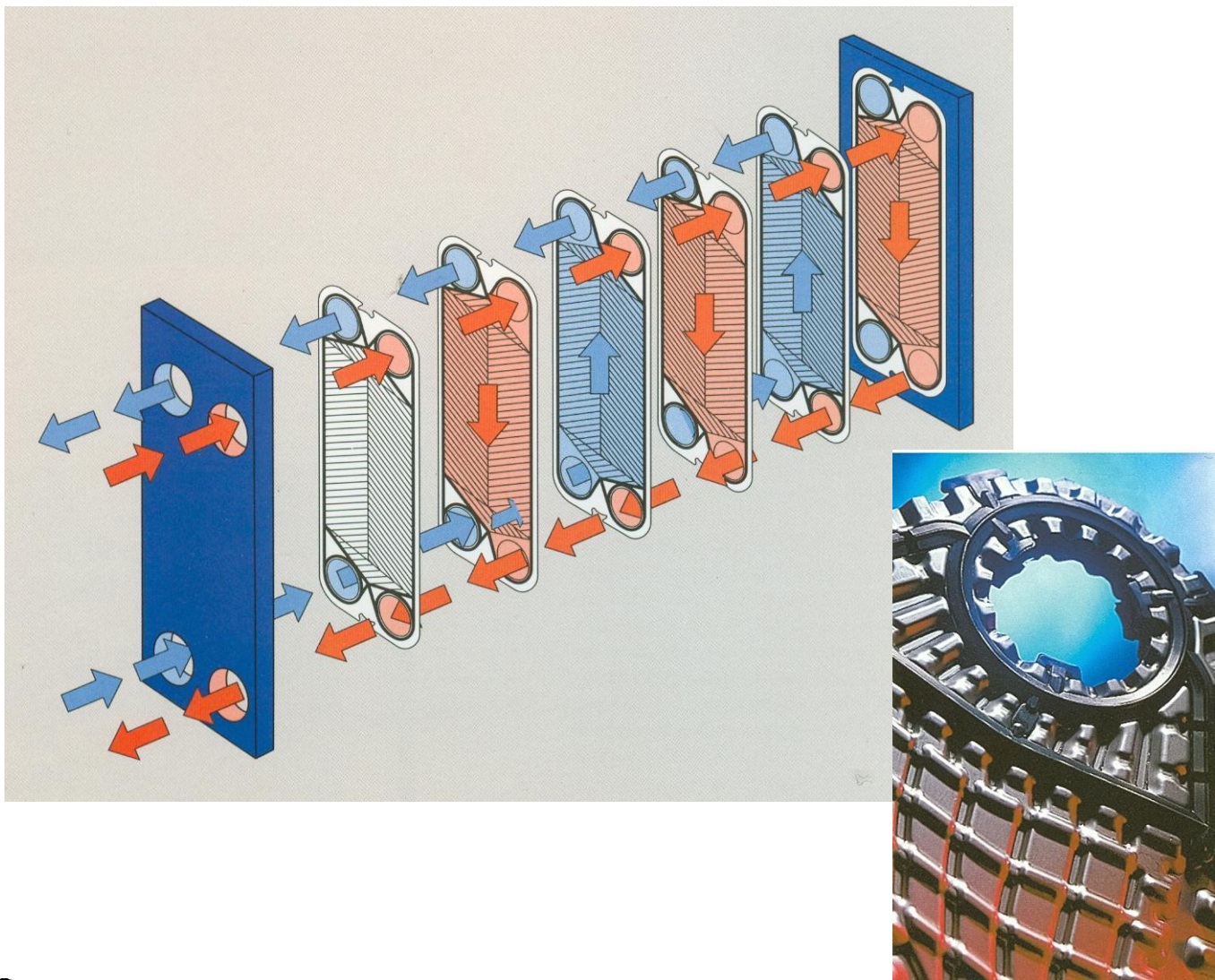
## **Рекуперативный теплообменник "труба в трубе"**



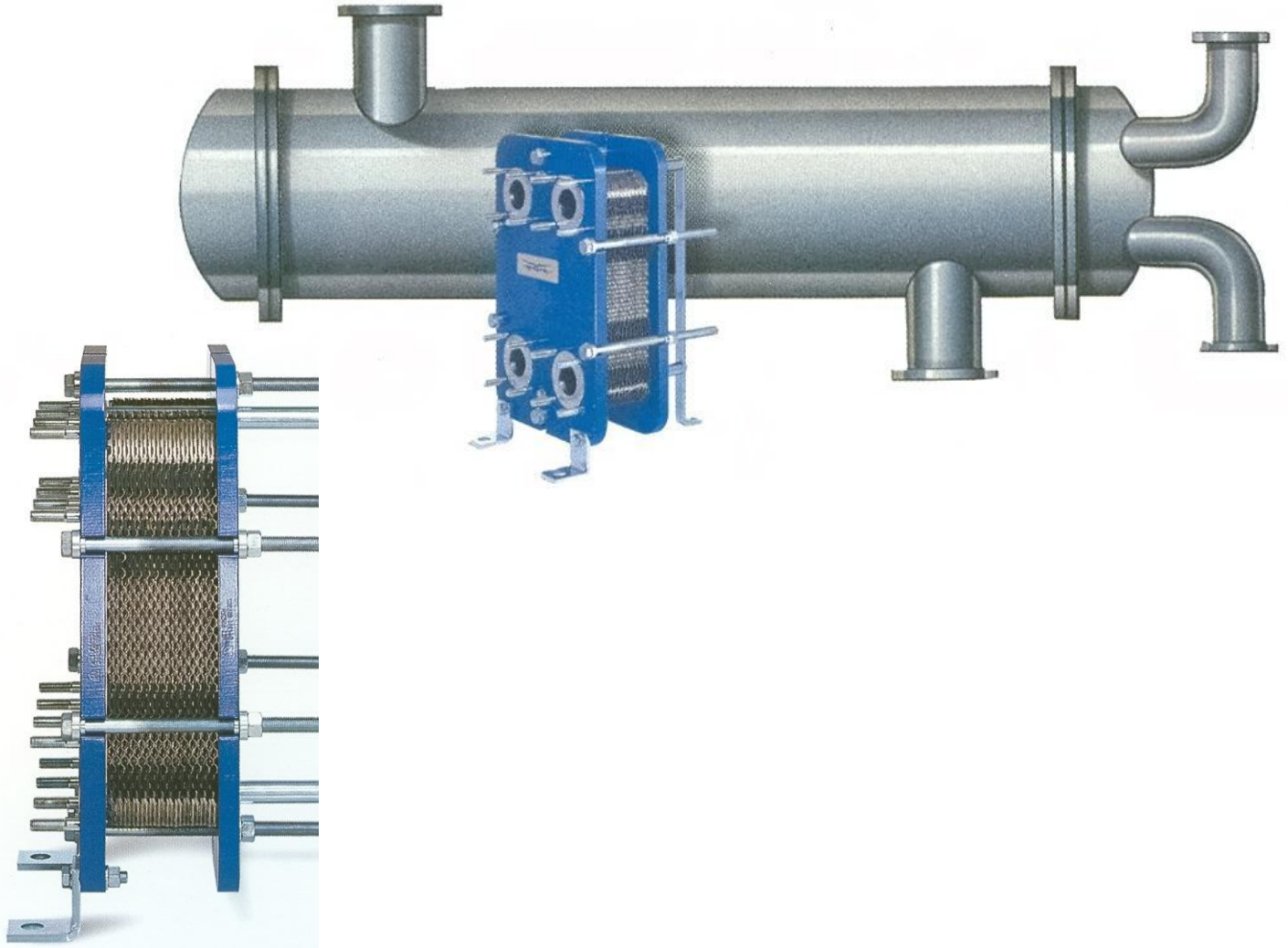
## **Кожухотрубчатый теплообменник**



# Компактные пластинчатые теплообменники

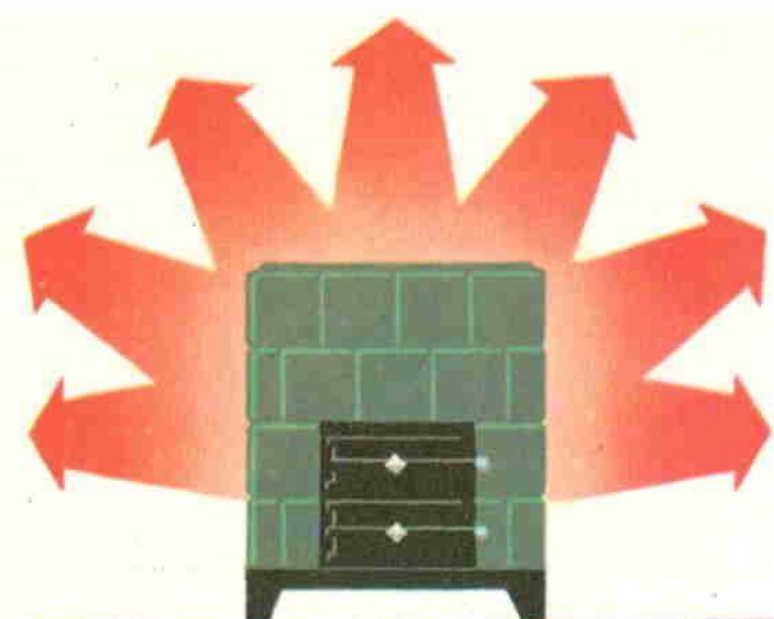


# Кожухотрубчатые и пластинчатые теплообменники



**ТЕПЛООБМЕН** – это самопроизвольный необратимый процесс пространственного распространения *теплоты*, под которым понимается обмен *внутренней энергией* между телами или областями одного тела или системы, вызванный *разностью температур* в теле или системе.

**ТЕПЛОТА** (количество теплоты, тепло – *разговорн.*) – это энергетическая характеристика *процесса* теплообмена, численно равная количеству энергии, которое получает (отдает) в этом процессе тело/система.



Теплота самопроизвольно **всегда** передается от горячего тела к холодному, и **никогда** – в обратном направлении. Все самопроизвольные процессы заканчиваются установлением **т/д равновесия** (здесь – **теплового**).

# МАССООБМЕН, ТЕПЛОМАССООБМЕН

Пространство может быть заполнено многокомпонентной смесью веществ. Если концентрации компонентов в различных точках пространства разные, происходит необратимый процесс переноса массы компонентов из одной области в другую. Этот процесс называется *массообменом*. Совместно протекающий процесс переноса теплоты и массы вещества называется *тепло-массообменом*.

Как любой реальный самопроизвольный процесс тепло-массообмена является необратимым и продолжается до тех пор, пока в системе не установится термодинамическое равновесие.



# Направление и движущая сила теплообмена

При теплообмене теплота самопроизвольно переходит от тела/области с более высокой температурой (более «нагретой») к телу/области с более низкой температурой (менее нагретой).

В результате разность температур в теле/системе в течение времени выравнивается. Т.обр., разность температур – **движущая сила** процесса теплообмена.

Процесс теплообмена необратим, т.е. сопровождается увеличением энтропии

$$ds > \frac{\delta q}{T}$$

## МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Все материальные тела (твердые, жидкие, газообразные) состоят из мельчайших структурных частиц (атомов, молекул) и обладают **ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИЕЙ  $U$** , включающей в себя энергию движения и взаимодействия всех частиц, составляющих тело:

*кинетическую энергию хаотического поступательного, вращательного и колебательного движения молекул и атомов внутри молекул – определяется температурой  $T$ ;*

*потенциальную энергию взаимодействия частиц – определяется средним расстоянием между ними, т.е. является функцией объема  $V$ , занимаемого газом;*

*энергию электронных оболочек атомов;*

*внутриядерную энергию*

*В теплотехнических процессах две последние составляющие обычно неизменны.*

В англоязычной литературе **внутренняя энергия** называется ***Thermal Energy*** (тепловая энергия).

**ТЕМПЕРАТУРА  $T$**  – физическая величина,

характеризующая степень нагретости тела. Параметр состояния (наряду с  $p$ ,  $V$ ).

Размерность – 1 К (Кельвин,  $T$  К); °С (градус Цельсия,  $t$  °С).

Абсолютный нуль температуры

$$T = 0 \text{ К соответствует } t = -273.15 \text{ °С};$$

$$1 \text{ К} = 1 \text{ °С}.$$

С точки зрения *молекулярно-кинетической теории идеального газа*  $T$  – мера интенсивности теплового движения молекул.

Средняя кинетическая энергия молекул

$$\frac{m\overline{w}^2}{2} = \frac{3}{2}kT \quad \Rightarrow \quad T = \frac{1}{3} \frac{m\overline{w}^2}{k}$$

$m$  масса молекулы, кг;  $\overline{w}$  – средняя квадратическая скорость поступательного движения молекул,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – константа Больцмана.

## ДАВЛЕНИЕ $p$

Физическая величина, характеризующая взаимодействие молекул тела с поверхностью. Численно равно силе, действующей на единицу площади поверхности тела по нормали к ней. Параметр состояния (наряду с  $T$ ,  $V$ ).

Размерность в СИ – Па (Паскаль) = 1 Н/м<sup>2</sup>.

1 атм = 760 мм рт. ст. =  $1.01325 \cdot 10^5$  Па = 1.01325 бар  $\approx$  0.101 Мпа.

В соответствии с *молекулярно-кинетической теорией* давление идеального газа

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m \overline{w^2}}{2} = nkT,$$

$n$  – число молекул в единице объема,  $1/\text{м}^3 = \text{м}^{-3}$ .

**ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ  $U$**  – свойство самой системы, **функция её состояния**, т.к. определяется параметрами состояния  $T$  (средняя кинетическая энергия частиц),  $p$  и  $V$  (расстояние между частицами), и не зависит от характера процесса, а определяется только начальным и конечным состояниями системы.

Для **идеальных газов**, в которых отсутствуют силы взаимодействия между молекулами,  $U$  – функция только температуры.

Внутренняя энергия сложной системы **аддитивна** – равна сумме энергий составляющих частей. В расчетах обычно используется **удельная** внутренняя энергия (единицы массы)

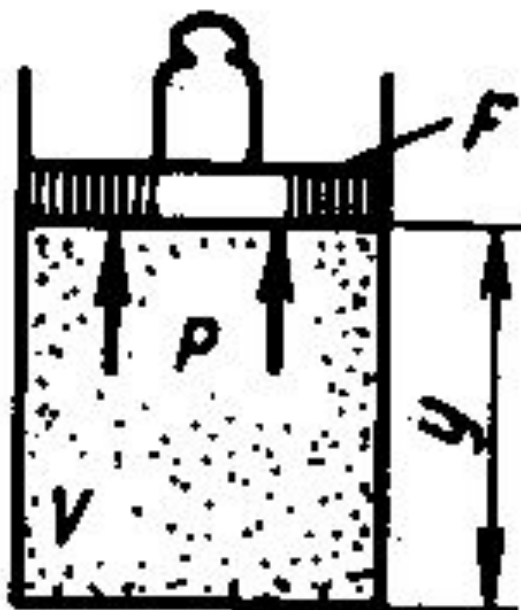
$$u = U/M, \quad \text{Дж/кг.}$$

$$\Delta u = \int_1^2 du = u_2 - u_1.$$

**Внутренняя энергия** обычно используется при расчетах процессов теплообмена в *изохорических* условиях ( $v = \text{const}$ ).

В *изобарных* условиях ( $p = \text{const}$ ), типичных для энергетических приложений, энергия тела/системы характеризуется другой функцией состояния – **энтальпией** ("энергией расширенной системы")

$$h = u + pv, \text{ кДж/кг.}$$



Физический смысл энтальпии выясним на следующем примере. Рассмотрим расширенную систему, включающую газ в цилиндре и поршень с грузом общим весом  $G$  (рис. 2.4). Энергия этой системы складывается из внутренней энергии газа и потенциальной энергии поршня с грузом в поле внешних сил:  $E = U + Gy$ . В условиях равновесия ( $G = pF$ ) эту функцию можно выразить через параметры газа:  $E = U + pFy = U + pV$ .

# ТЕРМОДИНАМИКА: 2 формы обмена энергией между системой/телом и окружающей средой

- **ТЕПЛОТА** (на микрофизическом уровне) и
- **РАБОТА** (на макрофизическом уровне).

Согласно 1-му началу термодинамики, изменение внутренней энергии системы происходит за счет подвода к ней теплоты и совершения системой внешней работы (например, *работы расширения* газа против внешнего давления)

$$du = \delta q - \delta l = \delta q - p dv. \quad (1)$$

При  $v = \text{const}$  внешняя работа отсутствует ( $\delta l = 0$ )

$$du = \delta q = c_v dT.$$

Выразим в (1)  $u$  через энтальпию  $u = h - pv$

$$dh = \delta q + v dp. \quad (2)$$

$$dh = \delta q = c_p dT \quad (\text{при } p = \text{const}).$$

Здесь использовано определение **удельной теплоёмкости**: количество теплоты, которое необходимо для нагревания единицы массы тела на 1 градус (К или °С)

– в *изохорическом* процессе ( $v = \text{const}$ )

$$c_v = \frac{\delta Q_v}{m \, dT}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad \Rightarrow \quad \delta Q_v = m c_v \, dT,$$

– в *изобарном* процессе ( $p = \text{const}$ )

$$c_p = \frac{\delta Q_p}{m \, dT}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \quad \Rightarrow \quad \delta Q_p = m c_p \, dT,$$



Итак, **теплота, работа** – формы передачи энергии, **а не формы энергии**, т.к. зависят от характера процесса (пути перехода системы от начального состояния к конечному) и не являются функциями состояния системы.

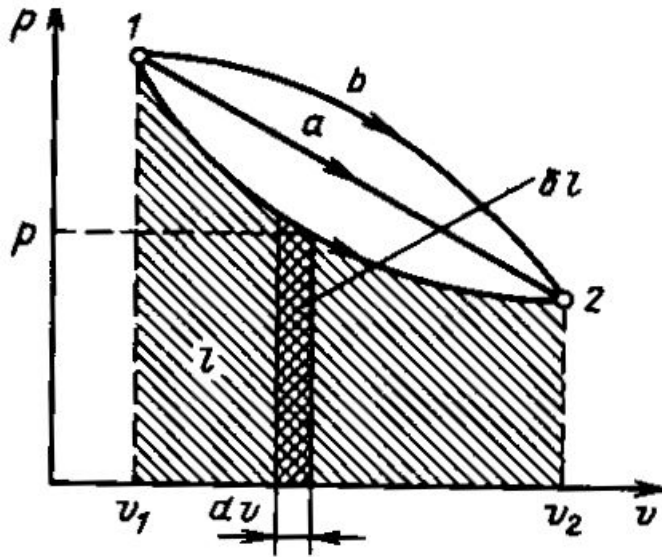


Рис. 2.2. Графическое изображение работы в  $p, v$ -координатах

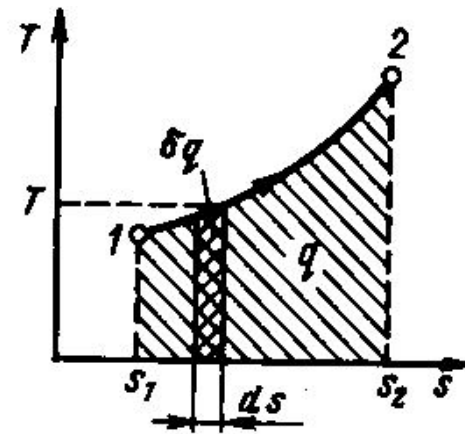


Рис. 3.1. Графическое изображение теплоты в  $T, s$ -координатах

**Теплота** (количество теплоты, тепло – разговорн.) – энергетическая характеристика процесса теплообмена, численно равная количеству энергии, которое получает (отдает) в процессе теплообмена тело/система.

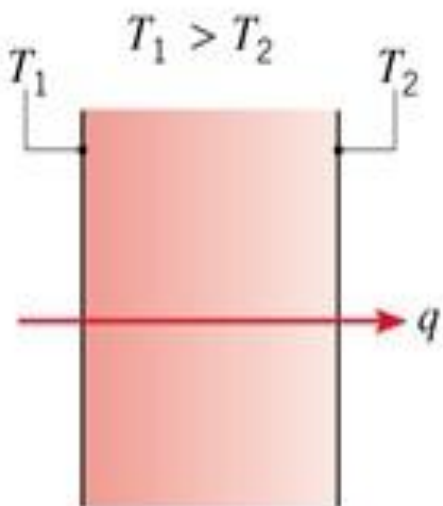
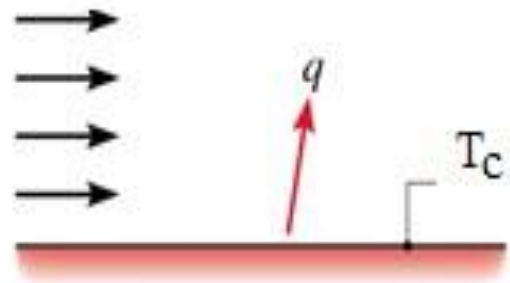
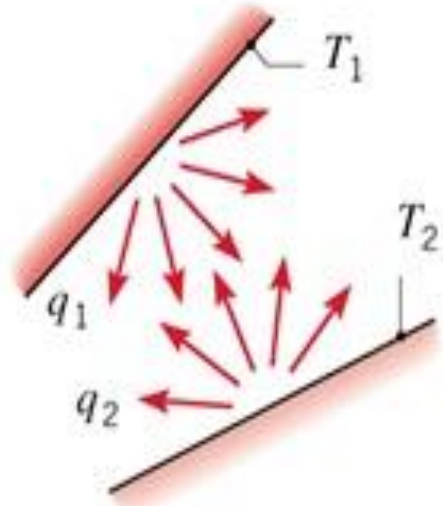
# ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ И ТЕРМИНЫ ТЕПЛООБМЕНА

Величина	Сущность	Обозн	Размерн.
Внутренняя энергия	Энергия тела, обусловленная его молекулярно-кинетической природой	$U, u$	Дж, Дж/кг
Температура	Мера внутренней энергии тела, его нагретости	$T; t$	К; °С
Количество теплоты	Количество тепловой энергии, переносимое через изотермическую поверхность за время $\tau > 0$	$Q_\tau$	Дж
Тепловой поток	Количество теплоты, переносимое через изотермическую поверхность <b>в единицу времени</b>	$Q$	Вт = Дж/с
Плотность теплового потока	Количество теплоты, переносимое через <b>единицу площади</b> изотермической поверхности <b>в единицу времени</b>	$q$	Вт/м <sup>2</sup>

# Основные способы (механизмы) передачи теплоты и массы

1. **ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ (кондукция) И ДИФФУЗИЯ** – молекулярный перенос теплоты и массы в неподвижных телах (газообразных, жидких и твердых) или между ними.
2. **КОНВЕКЦИЯ ТЕПЛОТЫ И МАССЫ** – перенос при макроскопическом перемещении объемов жидкостей (капельных и газов) между областями с разными температурами. Возможна только в текучей среде.
  - **свободная конвекция** – течение жидкости за счет разности плотностей в ее объеме;
  - **вынужденная** – принудительное течение жидкости за счет насоса или вентилятора.
3. **ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** – перенос теплоты посредством электромагнитных волн, обусловленный только температурой и оптическими свойствами излучающего тела.

# ТРИ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЗМА ТЕПЛООБМЕНА

Теплопроводность через тв. тело/неподвижную жидкость	Конвективный теплоперенос от поверхности к жидкости	Лучистый теплообмен между 2-мя поверхностями
	<p><math>T_c &gt; T_{ж}</math></p> <p>Движущаяся жидкость, <math>T_{ж}</math></p> 	

Молекулярный перенос энергии за счёт теплового движения **микрочастиц** (молекул, атомов, электронов) в твердых телах и неподвижных жидкостях / газах

Перенос теплоты при перемещении (течении) **макрочастиц** жидкости / газа; всегда сопровождается теплопроводностью жидкости

Обмен энергией посредством электромагнитного излучения в видимой и инфракрасной областях длин волн

В жильё и производственные помещения теплота подводится с помощью **отопительных радиаторов**

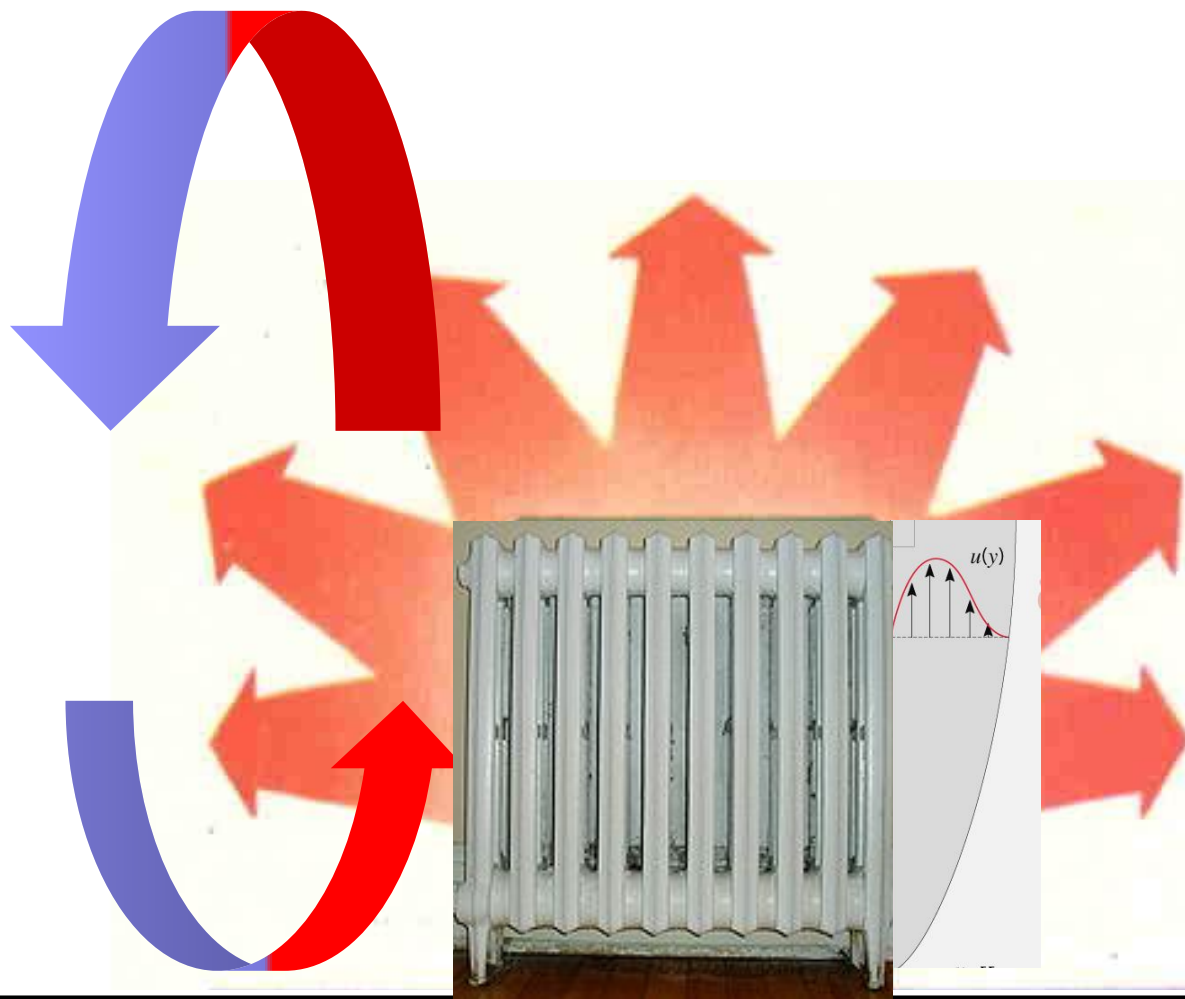


**Внутри:** *вынужденно-конвективная теплоотдача* от горячей воды к стенке радиатора

**В стенке радиатора:** *теплопроводность* изнутри наружу

**Снаружи:** *теплоотдача* от внешней поверхности в окружающую среду *свободной конвекцией и тепловым излучением*

# Свободноконвективный и лучистый перенос теплоты от поверхности нагревателя



# ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ . ЗАКОН ФУРЬЕ

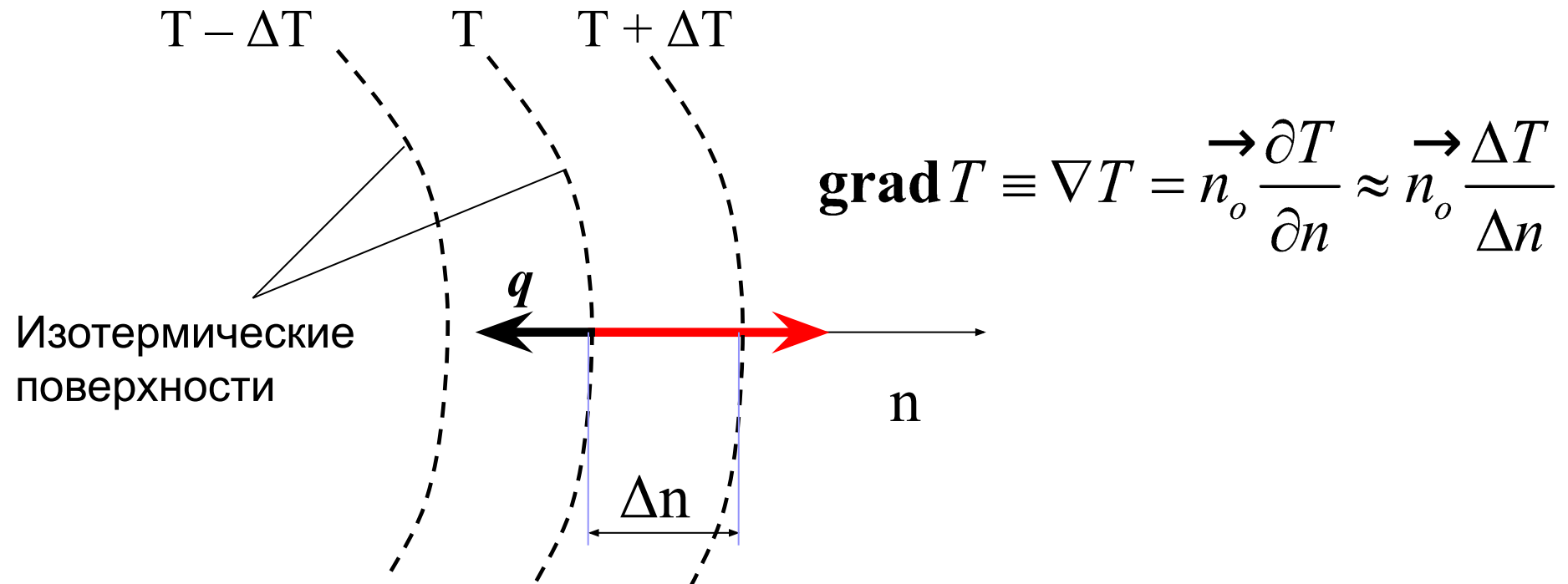
Перенос теплоты при непосредственном контакте более нагретых элементов тела (или среды) с менее нагретыми, осуществляемый посредством хаотического движения и взаимодействия микрочастиц (молекул, атомов, электронов, ионов), называется *теплопроводностью*. Интенсивность процесса теплопроводности в различных телах разная.

Плотность теплового потока в данной точке изотропной среды пропорциональна градиенту температуры в этой точке и направлена противоположно ему

$$, \quad q_{\text{Вт/м}^2} = -\lambda \text{ grad } T \quad (\text{Вт} = \text{Дж/с})$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$ , **Вт/(м·К)** называется *коэффициентом теплопроводности* (или просто *теплопроводностью*) и является физическим параметром вещества.

**Градиент температуры** – вектор, направленный в сторону увеличения температуры по нормали  $n$  к изотермической поверхности, через которую проходит тепловой поток, и равный производной температуры по координате  $n$ .



**Закон Фурье в скалярной форме:**  $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}$

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F_{\text{ВТ}}; \quad Q_{\tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F_{\tau} \text{ Дж}$$



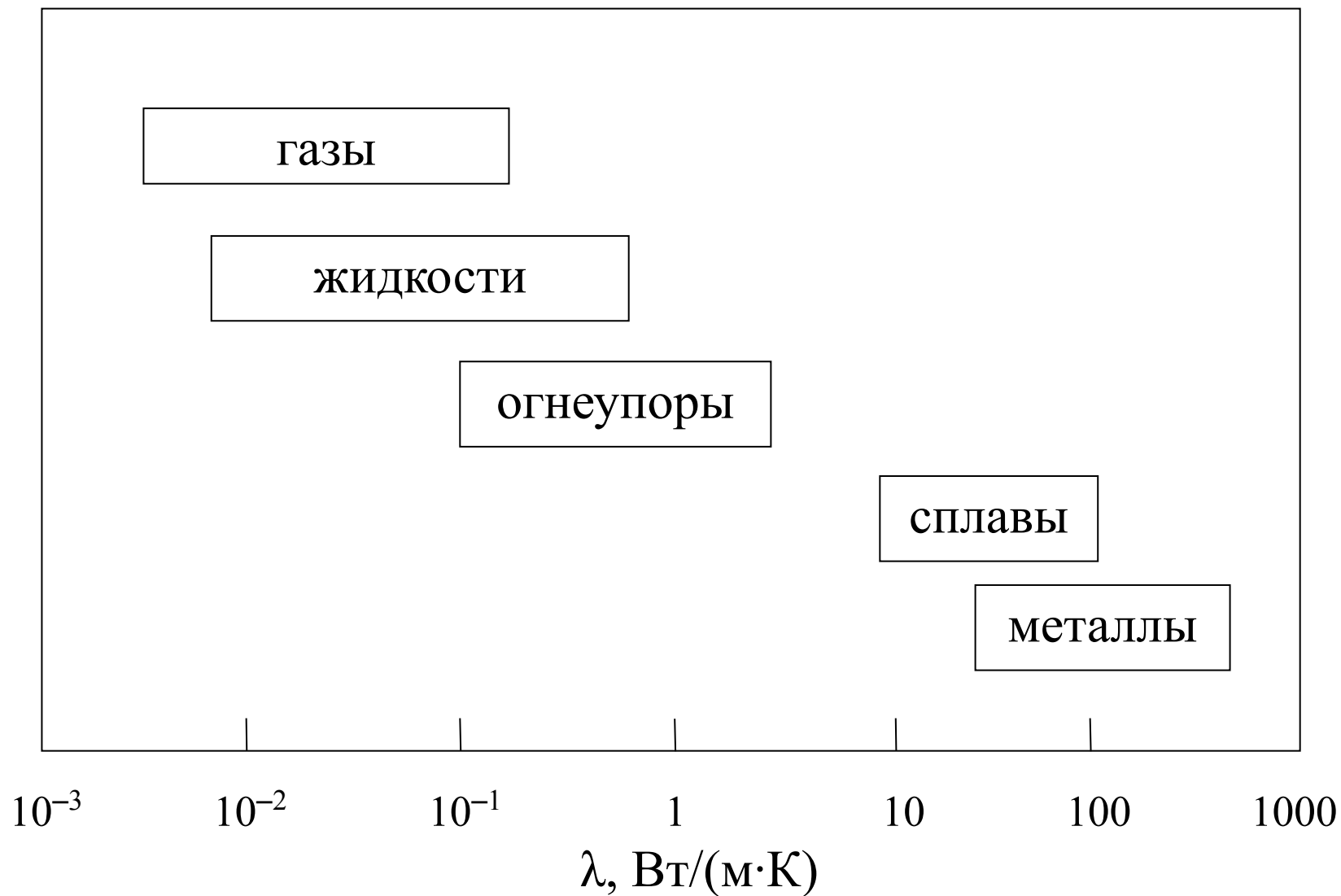
# Коэффициент теплопроводности

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{|\text{grad } T|} = \frac{Q_\tau}{(\partial T / \partial n) F \tau}, \quad \text{Вт/(м·К)}$$

Коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице.

В общем случае зависит от структуры вещества (*порозность*), его плотности, влажности, давления и температуры.

# Коэффициенты теплопроводности



Газы — плохие проводники теплоты. Теплопроводность газов обусловлена хаотическим тепловым движением молекул. Она возрастает с увеличением температуры, так как при этом увеличивается скорость теплового движения. При не очень высоких давлениях теплопроводность газов от давления не зависит из-за того, что с увеличением давления, хотя и увеличивается число молекул в единице объема, но одновременно уменьшается длина свободного пробега.

Из кинетической теории газов (Л.Больцман) следует, что

$$\lambda = \frac{1}{3} w l c_v \rho$$

$$p \nearrow : \rho \nearrow, l \searrow \quad \Rightarrow \quad \rho l \approx const, \lambda \approx const$$

$$T \nearrow : w \nearrow, c_v \nearrow \quad \Rightarrow \quad \lambda \nearrow$$

# Коэффициент теплопроводности газов

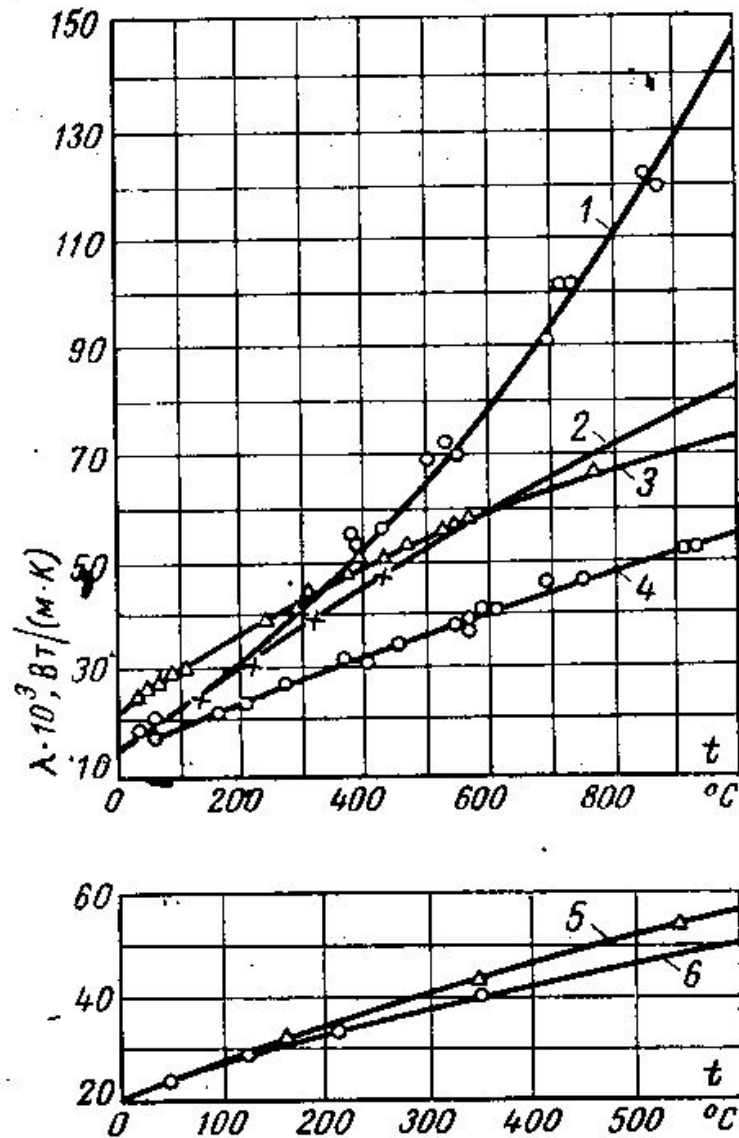


Рис. 1.5. Коэффициенты теплопроводности газов.

1 — водяной пар; 2 — двуокись углерода; 3 — воздух; 4 — аргон; 5 — кислород; 6 — азот.

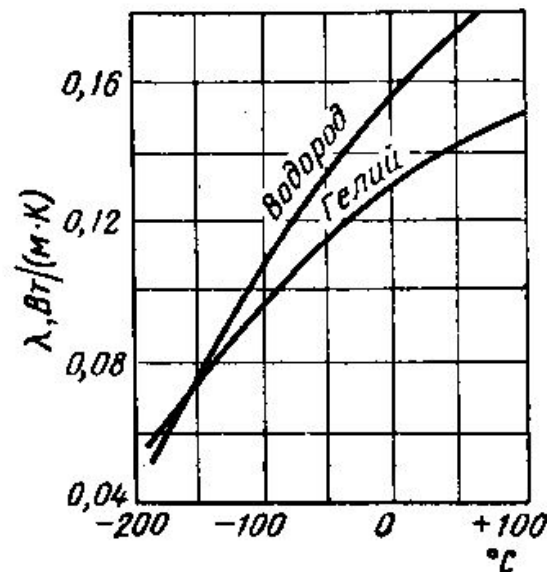


Рис. 1.6. Коэффициенты теплопроводности гелия и водорода.

**В капельных жидкостях и особенно твёрдых диэлектриках** атомы/молекулы "упакованы" гораздо более плотно, чем в газах, и механизм теплопроводности можно представить как перенос энергии путем упругих волн колебаний молекул.

Передача теплоты в твердых телах — диэлектриках происходит посредством колебаний кристаллической решетки, в узлах которой находятся атомы, а в жидкостях — за счет упругих колебаний молекул и их перескока из одной области в другую.

Для жидкостей ( $A$  – коэффициент  $\sim$  скорости распространения звуковых колебаний)

$$\lambda = A \frac{c_p \rho^{4/3}}{M^{1/3}}$$

$$Tc \nearrow : c \text{ const } \searrow, \quad \rho \approx \quad \Rightarrow \quad \lambda \searrow$$

$$p \nearrow : \quad \lambda \nearrow$$

# Коэффициент теплопроводности жидкостей и твёрдых диэлектриков

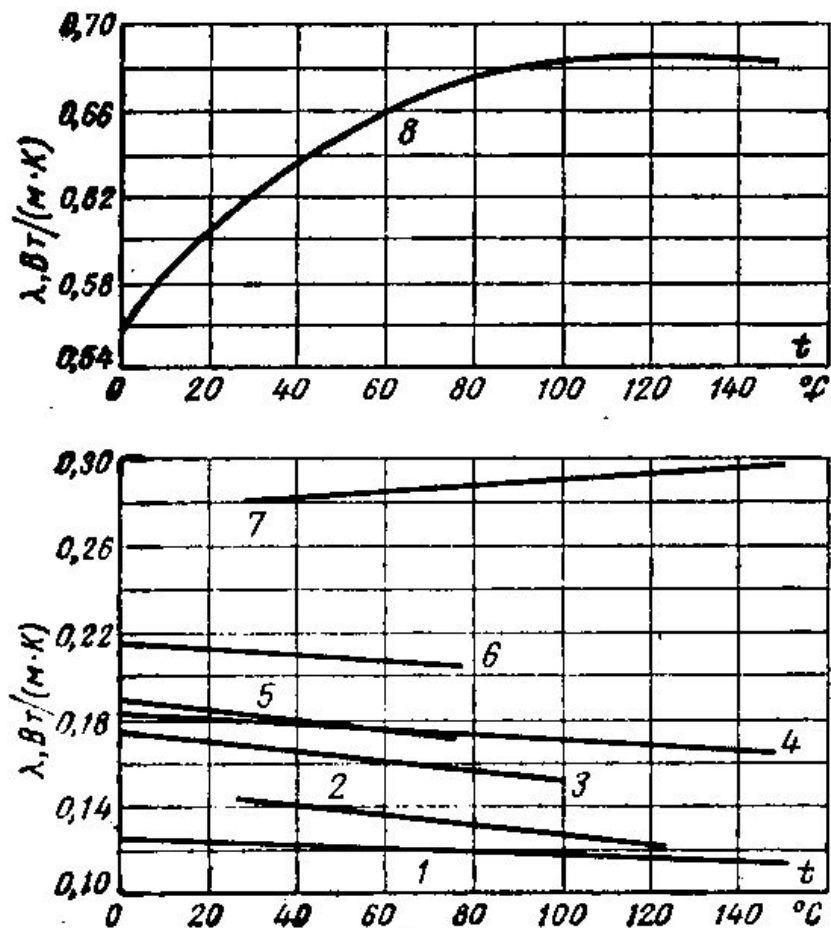


Рис. 1.7. Коэффициенты теплопроводности различных жидкостей.

1 — вазелиновое масло; 2 — бензол; 3 — ацетон; 4 — касторовое масло; 5 — спирт этиловый; 6 — спирт метиловый; 7 — глицерин; 8 — вода.

# и твёрдых диэлектриков

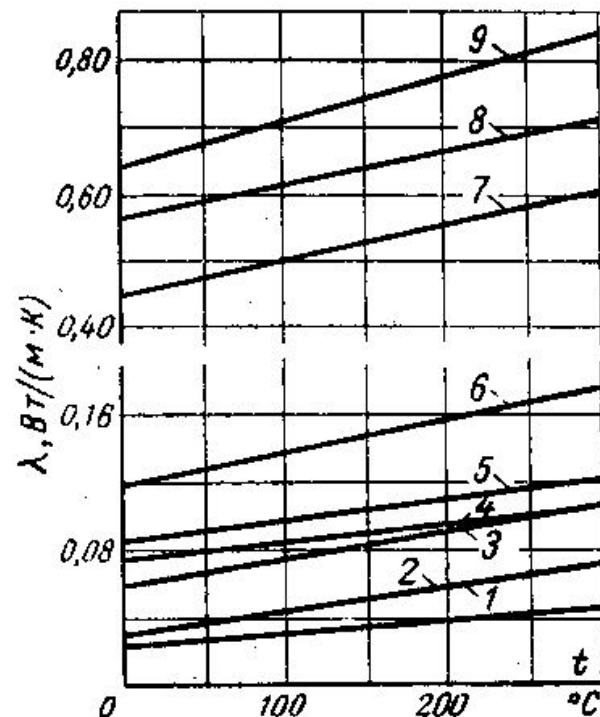


Рис. 1.10. Коэффициенты теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов.

1 — воздух; 2 — минеральная шерсть; 3 — шлаковая вата; 4 — ньувель; 5 — совелит; 6 — диатомитовый кирпич; 7 — красный кирпич; 8 — шлакобетонный кирпич; 9 — шамотный кирпич.

**В металлах – лучших проводниках теплоты –** теплопроводность при не очень низких температурах обусловлена тепловым движением свободных электронов, которые можно рассматривать как идеальный одноатомный газ. Поэтому коэффициент теплопроводности металлов обратно пропорционален их удельному электрическому сопротивлению. Определенный вклад вносит перенос энергии путем колебательных движений атомов в кристаллической решётке.

**В металлических сплавах** наличие примесей приводит к ухудшению теплопроводности по сравнению с чистыми металлами: **медь** –  $\lambda = 390$  Вт/(м.К), **латунь** (10-40% цинка) – 100-120 Вт/(м.К). Причина – рассеяние электронов на структурных неоднородностях.

# Коэффициент теплопроводности металлов и сплавов

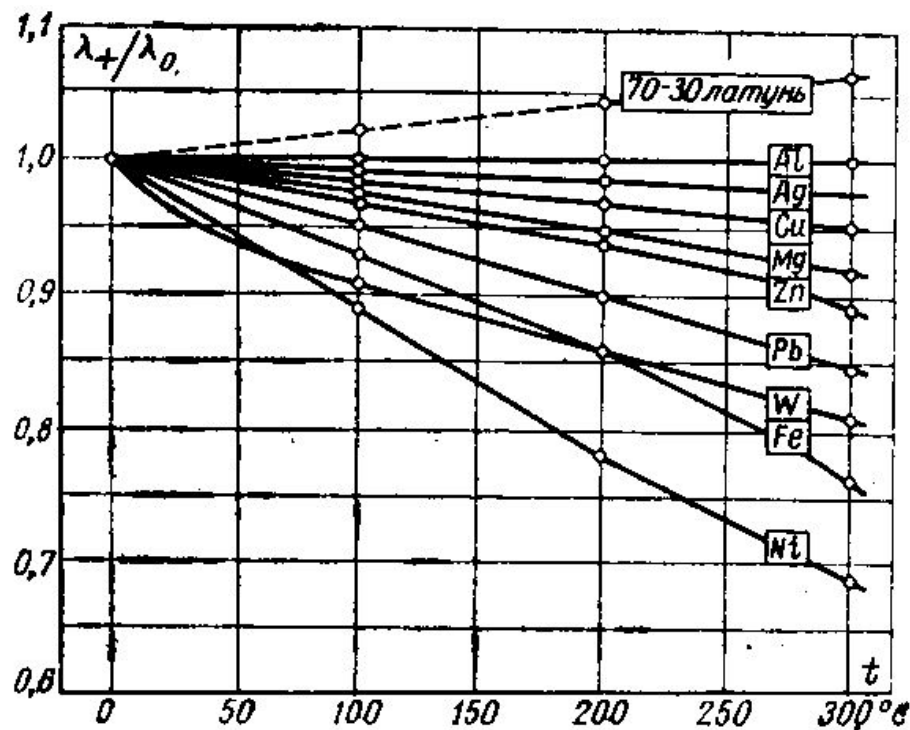


Рис. 1.8. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для некоторых чистых металлов.

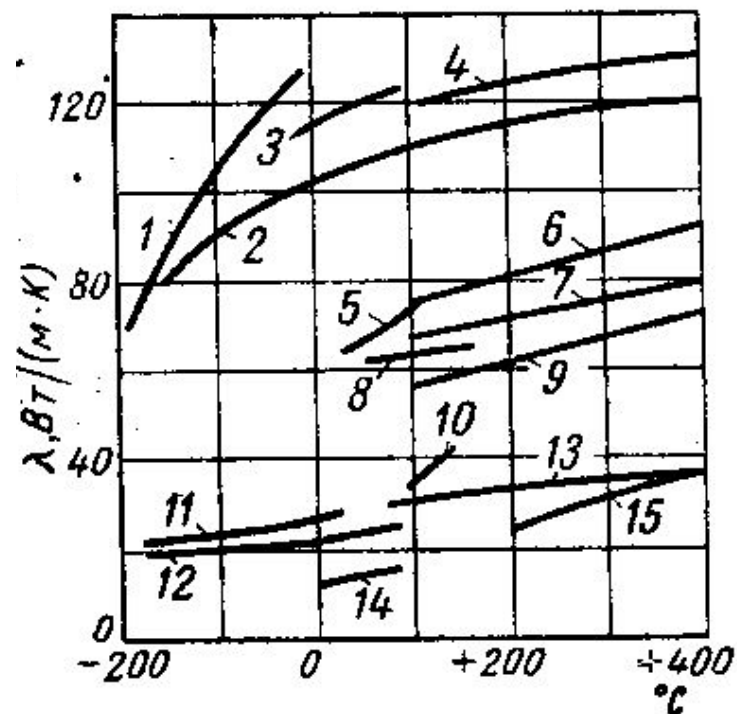


Рис. 1.9. Коэффициенты теплопроводности различных сплавов.

1 — латунь 18; 2 — латунь 30; 3 — латунь 12; 4 — нихром; 5 — бронза; 6 — марганцовистая бронза; 7 — орудийная бронза; 8 — сплав олова и цинка; 9 — фосфористая бронза; 10 — белый металл; 11 — константан; 12 — монель-металл; 13 — марганец; 14 — никелевая сталь; 15 — жидкий сплав олова с цинком.



# Коэффициенты теплопроводности (при комн. температуре)

<b>Металлы и сплавы</b>	
<b>Материал</b>	<b><math>\lambda</math> Вт/(м·К)</b>
Алюминий	204
Бронза (Cu + Sn)	64
Латунь (Cu + Zn)	93
Медь	384
Серебро	458
Сталь: углеродистая	45
нержавеющая	18
Титан	15
Чугун	90

## Строительные и теплоизоляционные ( $\lambda \leq 0.25$ Вт/(м·К))

Материал	$\lambda$ Вт/(м·К)	
Асбест	0,15	
Бетон	1,28	
Вата минеральная	<b>0,05</b>	
<b>Кирпич:</b>	диатомовый	0,25
	красный/силикатный	0,76/0,82
	шамотный	1,14
Масляный слой загрязнений	0,15	
Накипь	1,75	
Пенопласт	<b>0,05</b>	
Пробковые плиты	<b>0,05</b>	
Резина	0,16	
Ржавчина	1,15	
Сажа	0,09	
Сосна поперек/вдоль волокон	0,15 / 0,35...0,72	
Стекловата	<b>0,05</b>	
Стекло обыкновенное	0,75	
Шлаковата	0,16	

## Жидкости и газы – разница на порядок величины

Материал	$\lambda$ Вт/(м·К)
Аммиак	0,60
Вода	0,60
Масло МК	0,15
Мазут	0,12
Насыщенный водяной пар (373 К)	0,024
Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )	0,015
Сухой воздух	0,026
<b>Водород</b>	<b>0,17</b>

**Пористые** теплоизоляционные материалы имеют наиболее низкие к-ты теплопроводности благодаря тому, что в порах находится воздух.

## Зависимость $\lambda$ от температуры

В процессе теплообмена температура тел изменяется во времени и неравномерно распределяется по их объёму, что приводит к соответствующему изменению коэффициента теплопроводности.

В практических расчётах зависимость  $\lambda$  от температуры часто можно принять *линейной*

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt) \quad \text{Вт/(м·К),}$$

где  $\lambda_0$  – значение  $\lambda$  при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  ;  $b$  – постоянная, определяемая опытным путём.

**ДИФФУЗИЯ** – молекулярный перенос массы вещества в какой-либо среде, обусловленный тепловым движением молекул, атомов, ионов при наличии разности концентраций переносимого вещества.

### Закон Фика

Плотность потока вещества (вектор) пропорционален градиенту его концентрации противоположен ему по направлению

$$j = - D \text{ grad } C = - D dC/dn, \quad \text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

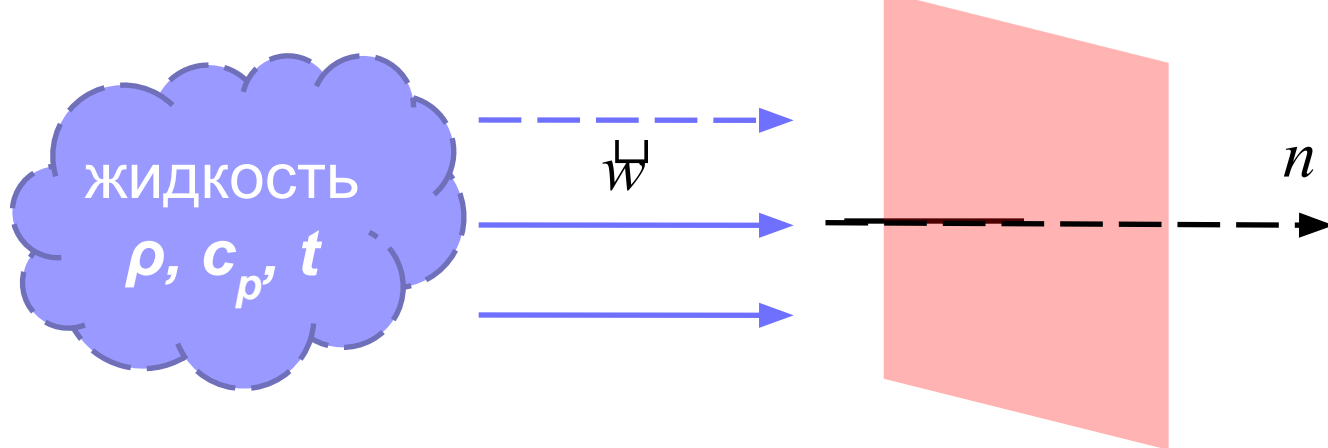
**D, м<sup>2</sup>/с** – коэффициент молекулярной диффузии, физический параметр диффундирующего вещества и среды;

**C, моль/м<sup>3</sup>** – концентрация диффундирующего вещества

## КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

В движущихся жидкостях и газах происходит конвективный перенос теплоты и массы за счет перемещения макрочастиц жидкости из одной точки пространства в другую. Организованно движущаяся жидкость переносит свои энергию и массу.

Одновременно в перемещающейся жидкости всегда происходит хаотическое тепловое движение микрочастиц (молекул, атомов), посредством которого осуществляются молекулярный перенос *теплоты* теплопроводностью и *массы* – диффузией.



$w$  вектор среднemasсовой скорости жидкости, м/с.

Если через единицу контрольной поверхности нормально к ней в единицу времени проходит масса жидкости

$$\text{кг}/(\text{м}^2\text{с}), G = \rho w$$

то вместе с ней конвекцией переносится плотность теплового потока

$$q_{\text{конв}} = \rho w c_p t$$

С учётом переноса теплопроводностью в жидкости

$$q = q_{\text{тпр}} + q_{\text{конв}} = -\lambda \nabla t + \rho w c_p t$$

# КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛО– и МАССООБМЕН

Перенос **теплоты** или **массы**, обусловленный макроскопическим движением жидкости как целого. Всегда сопровождается молекулярным переносом, который, однако, играет второстепенную роль.

Плотности потоков тепла и массы можно записать в форме законов Фурье и Фика, введя в них конвективный член (первый в правой части)

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= c_p T \rho \mathbf{w} - \lambda \operatorname{grad} T, & \text{Вт/м}^2, \\ \mathbf{j} &= C \mathbf{w} - D \operatorname{grad} C, & \text{моль/(м}^2 \cdot \text{с)}, \end{aligned}$$

$\mathbf{w}$  – вектор среднemasсовой скорости жидкости, м/с.



# ТЕПЛООТДАЧА

## Закон Ньютона – Рихмана

Плотность теплового потока при теплоотдаче пропорциональна разности температур между поверхностью стенки и жидкостью вдали от поверхности

$$q_c = \alpha (t_c - t_{жс}) \text{ Вт/м}^2;$$

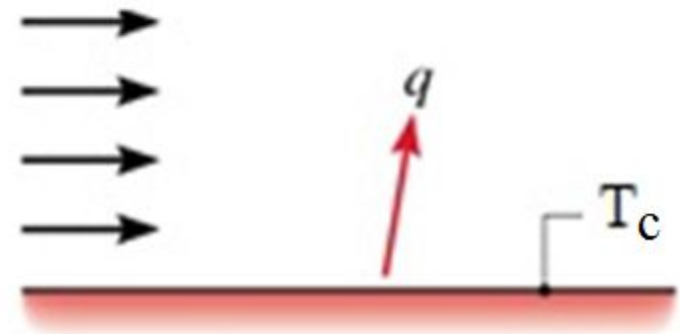
$$\alpha = \frac{q_c}{t_c - t_{жс}} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} - \text{коэффициент теплоотдачи,}$$

численно равный плотности теплового потока на границе тела и жидкости, отнесённой к разности температур поверхности тела и жидкости вдали от поверхности.

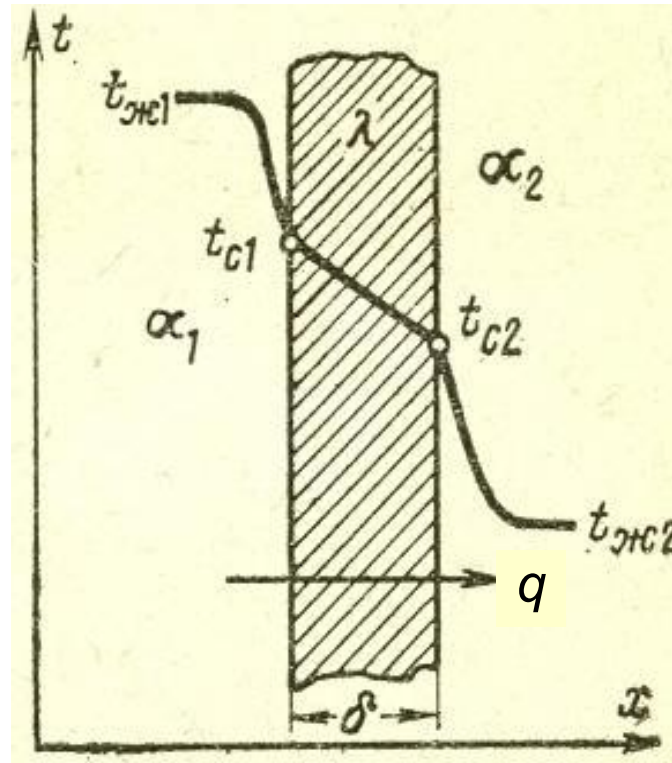
Конвективный теплоперенос  
от поверхности к жидкости

$$T_c > T_{ж}$$

Движущаяся жидкость,  $T_{ж}$



**Теплопередача** – перенос теплоты от одной жидкости к другой *через твердую стенку*.



теплоотдача – теплопроводность – теплоотдача

$$q = \alpha_1 (t_{жс1} - t_{c1}) = \frac{\lambda_c}{\delta_c} (t_{c,1} - t_{c,2}) = \alpha_2 (t_{c,2} - t_{жс2}), \frac{\text{Вт}}{\text{М}^2}$$

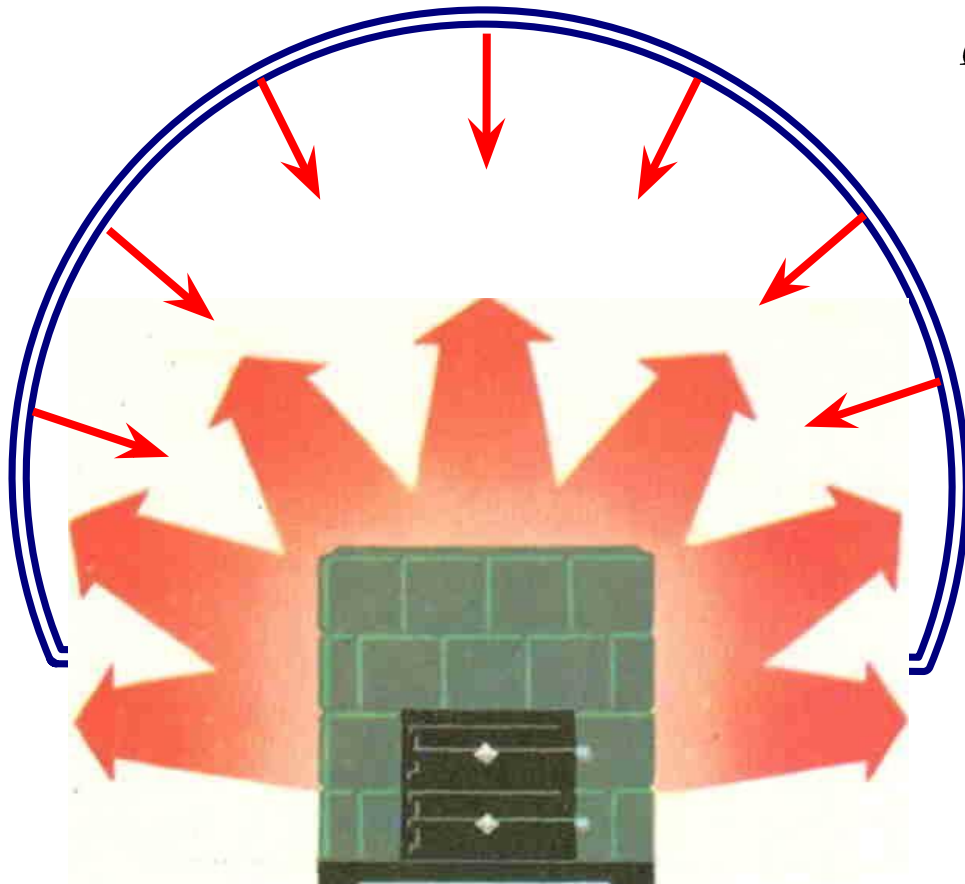
# ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛОБМЕН

Все тела излучают и поглощают лучистую энергию.

Интенсивность *теплового* излучения зависит от температуры и свойств поверхности тела:

$$W_m \approx \varepsilon \sigma_0 T^4 \quad / \quad ^2$$

$$W_{T_1-2} \sim (T_1^4 - T_2^4), \quad / \quad ^2$$



В отличие от теплопроводности и конвекции, здесь нет необходимости в контакте тел, участвующих в обмене; максимальная интенсивность ЛТО – в вакууме.

При наличие между телами разделяющей среды лучистый теплообмен сопровождается теплопроводностью и конвекцией (сложный теплообмен).