

ТЕПЛООБМЕН

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА

1.1 Виды теплообмена

Три основных способа переноса теплоты, отличающихся по своим физическим механизмам:

- ① теплопроводность
- ② конвекция
- ③ излучение



За счет излучения теплота передается во всех лучепрозрачных средах, в том числе и в вакууме.

Теплопроводность – это перенос теплоты непосредственно в телах или между телами при их соприкосновении, осуществляемый молекулами, атомами, электронами.

Конвекция – это перенос теплоты в жидких и газообразных средах за счет перемещения неравномерно нагретых объемов среды.

Тепловое излучение – перенос энергии от одного тела к другому электромагнитными волнами определенной длины (инфракрасный спектр).

Излучение осуществляется твердыми телами, жидкостями и 3-х и более атомными газами.

Совместная передача теплоты теплопроводностью и конвекцией называется ***конвективным теплообменом***.

Теплоотдача — конвективный теплообмен между твердой стенкой и движущейся средой.

В реальных условиях теплота передается одновременно теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Такое явление называется ***сложным теплообменом***.

Передача теплоты от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку называется ***теплопередачей***.

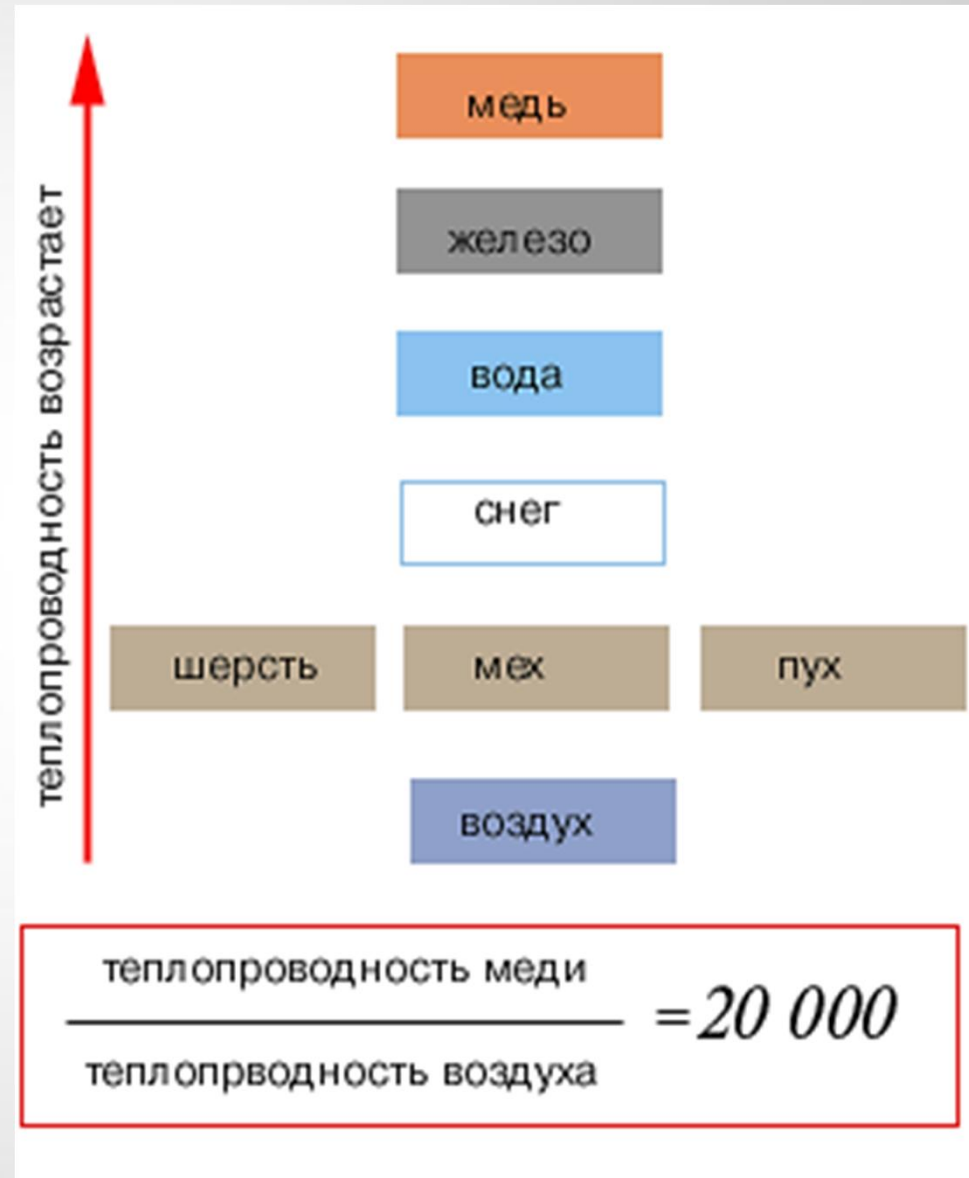
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ



Теплопроводность веществ

Это вид теплообмена, при котором происходит непосредственная передача энергии от частиц более нагретой части тела к частицам его менее нагретой части.

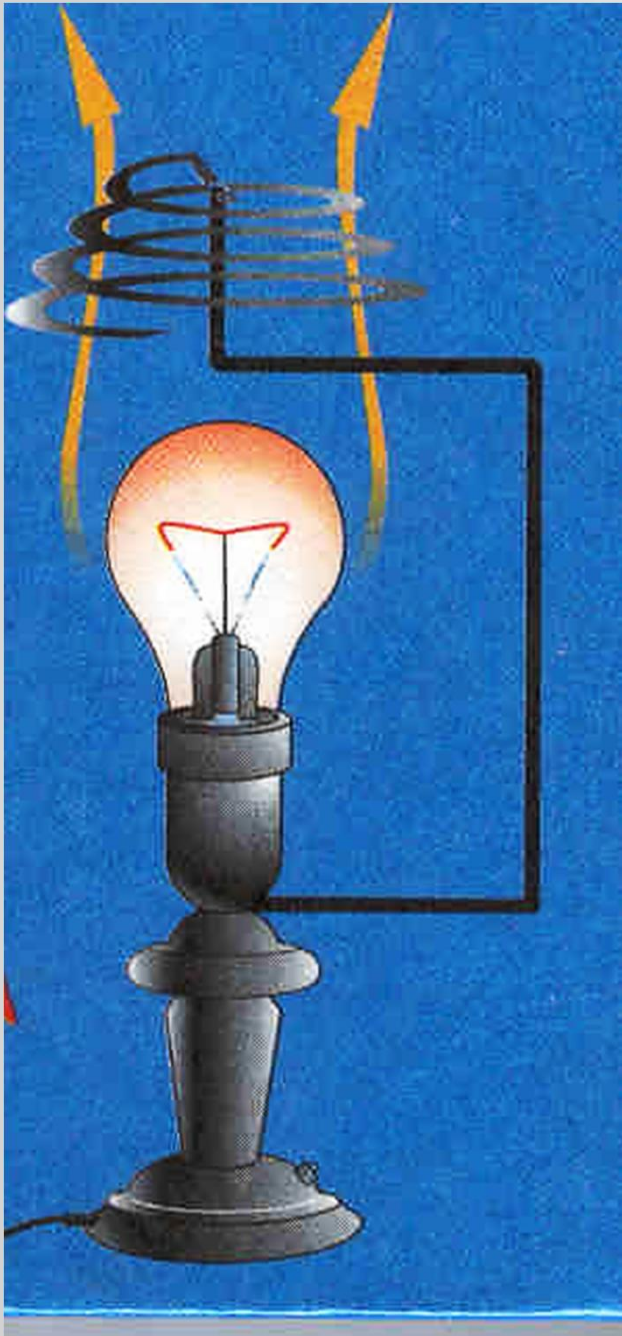
Само вещество не перемещается вдоль тела - переносится лишь энергия.



КОНВЕКЦИЯ

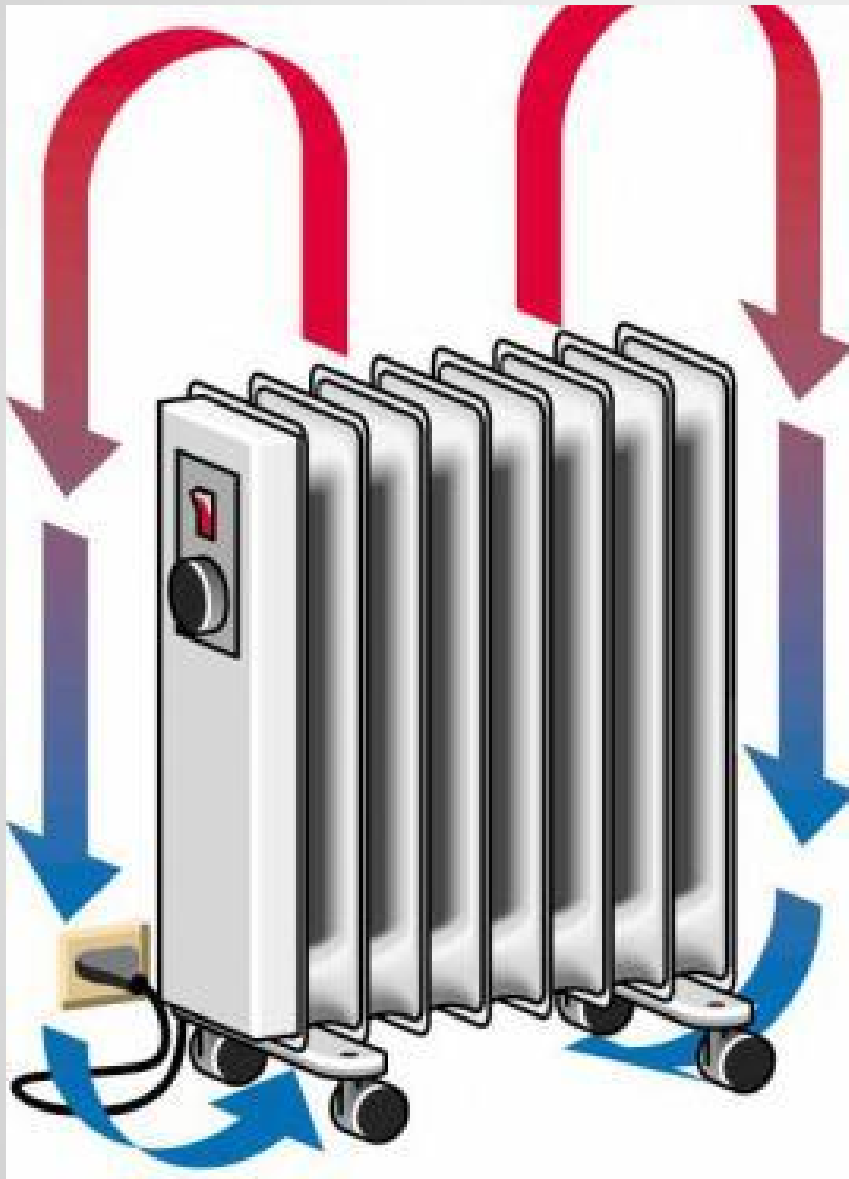


Нагревающийся от
лампочки воздух,
поднимается вверх,
переноса с собой энергию.

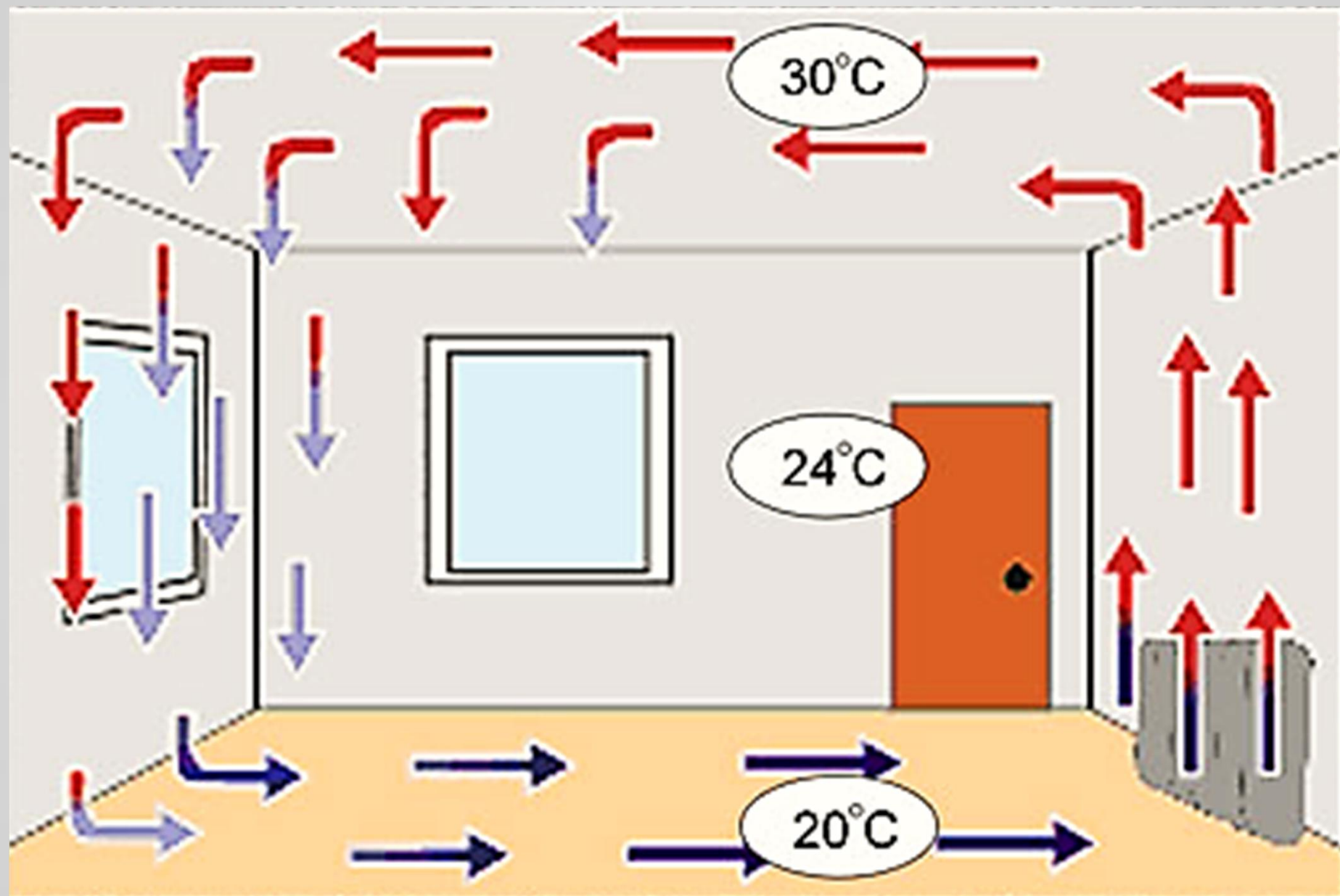


- Это перенос тепла струями жидкости или газа
- Конвекция в твердых телах и вакууме происходить не может

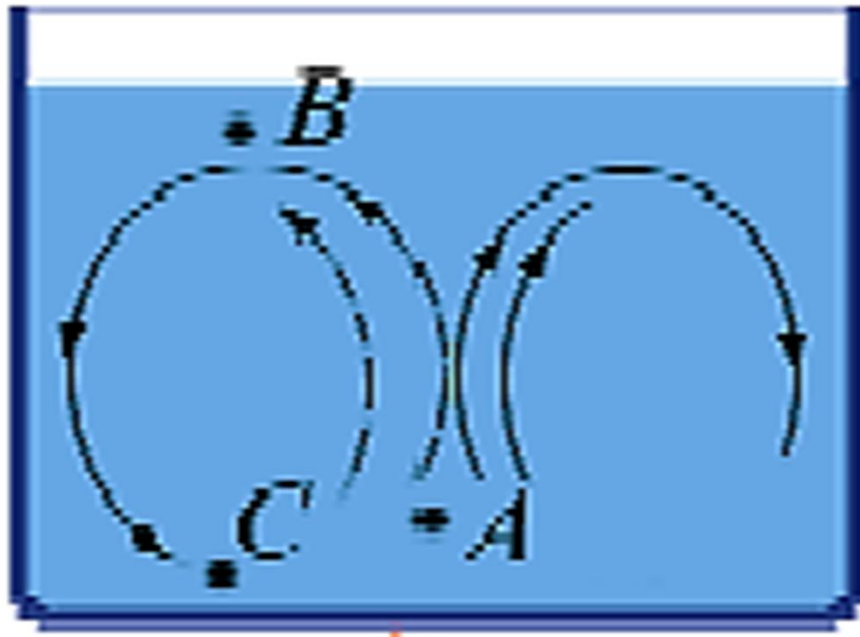
Механизм конвекции в газах



Теплый воздух имеет меньшую плотность и со стороны холодного воздуха на него действует сила Архимеда, направленная вертикально вверх.



Механизм конвекции в жидкостях



А – жидкость нагревается и вследствие уменьшения ее плотности, движется вверх.

В – нагретая жидкость поднимается вверх.

С – на место поднявшейся жидкости приходит холодная, процесс повторяется.



В результате
конвекции в атмосфере
образуются ветры у моря -
это дневные и ночные бризы,

охлаждается корпус
космического корабля,



обеспечивается водяное охлаждение
двигателей внутреннего сгорания.

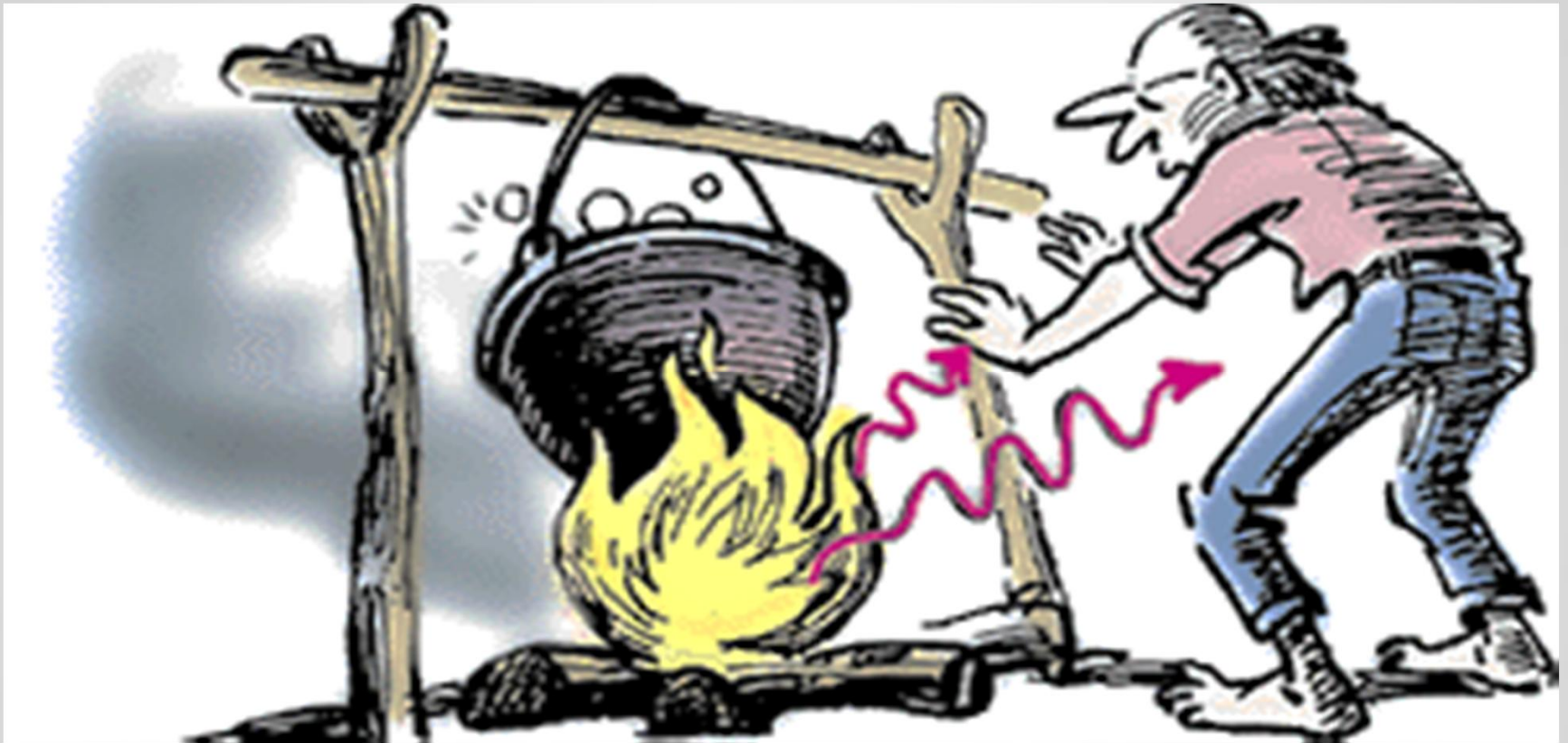
ИЗЛУЧЕНИЕ



**Солнце нагревает
Землю, моря, океаны.
Однако причиной такой
теплопередачи не может
быть ни теплопроводность,
ни конвекция!**

Почему?

Это теплообмен, при котором энергия переносится различными лучами.



Тепло от костра передается человеку путем излучения энергии, так как теплопроводность воздуха мала, а конвекционные потоки направлены вверх.

Механизм излучения



Температура Солнца очень высока, поэтому оно излучает много энергии

Нагретые тела
излучают
электромагнитные
волны

в различных
диапазонах
Излучение может
распространяться
и в вакууме

Около 50% энергии
излучаемой
Солнцем является
лучистой энергией ,
эта энергия -

источник жизни на Земле

1.2 Основные понятия и определения

- Û Легкоподвижная среда (жидкость или газ), используемая для переноса теплоты, называется *теплоносителем*.
- Û *Поверхность теплообмена F* – это поверхность, через которую происходит передача теплоты.
- Û *Тепловой поток, Q , [Вт]* – это количество теплоты, передаваемое через поверхность теплообмена F в единицу времени. В отличие от теплоты тепловой поток является векторной величиной, имеющей направление. Тепловой поток направлен в сторону распространения теплоты, т.е. в сторону наибольшего уменьшения температуры.

ÿ *Поверхностная плотность теплового потока* q , [Вт/м²] – это количество теплоты, передаваемое в единицу времени через единичную площадь поверхности теплообмена.

$$q = \frac{Q}{F}$$

ÿ *Линейная плотность теплового потока* q_l , [Вт/м]– это тепловой поток через единицу длины цилиндрической стенки

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

Û Температурным полем называется совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого пространства в данный момент времени.

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

где t – температура; x, y, z – пространственные координаты; τ – время.

Температурное поле, зависящее от времени - *нестационарное* (неустановившийся тепловой режим).

Когда распределение температуры не изменяется со временем, температурное поле называется *стационарным* (установившийся тепловой режим):

$$t = f(x, y, z)$$

Û Поверхность, во всех точках которой температура одинакова, называется *изотермической*.

Û *Градиент температурного поля* ($\text{grad } t$) – есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону наибольшего возрастания температуры и численно равный производной от температуры по этому направлению.

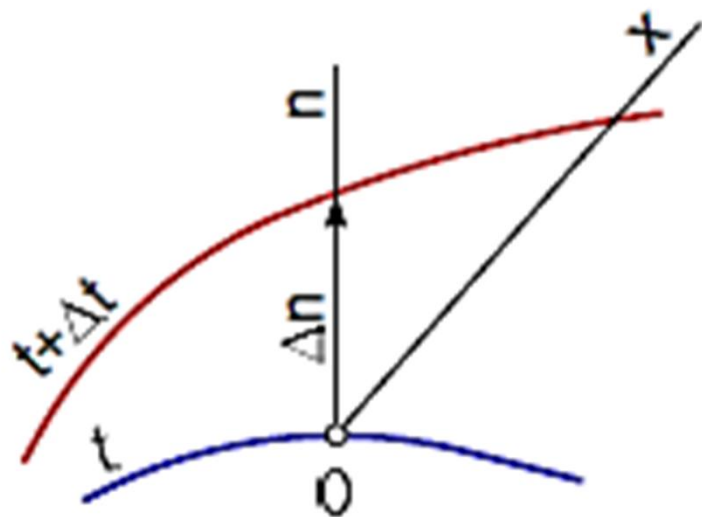


Рисунок 1.1 - К определению градиента температурного поля

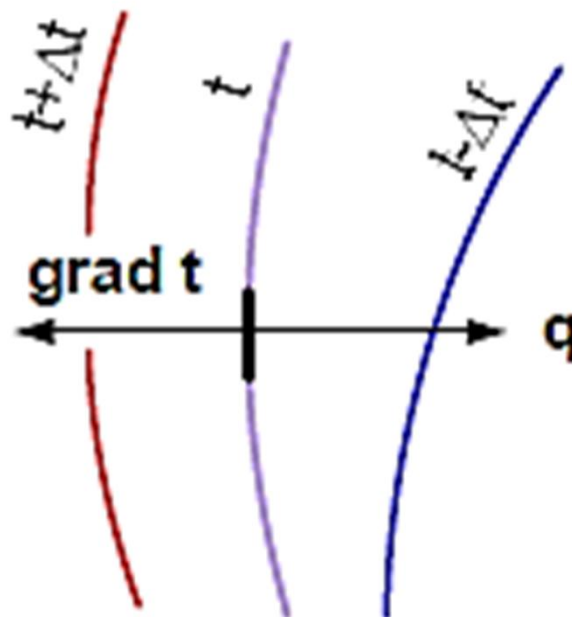


Рисунок 1.2 - Вектора градиента температурного поля и теплового потока

2 ТЕОРИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Под теплопроводностью следует понимать процесс переноса теплоты через соприкосновение структурных частиц тела (атомов, молекул, электронов и др.). В разных средах механизм передачи теплоты может отличаться.

2.1 Закон Фурье

Поверхностная плотность теплового потока, передаваемого теплопроводностью, пропорциональна градиенту температурного поля:

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

где λ – *коэффициент теплопроводности*, Вт/(м·К) - характеризует способность вещества, из которого состоит рассматриваемое тело, проводить теплоту.

Знак « $-$ » указывает на противоположные направления вектора теплового потока и вектора градиента температурного поля.

Вектор плотности теплового потока q всегда направлен в сторону наибольшего уменьшения температуры.

Численное значение коэффициента теплопроводности λ равно количеству теплоты, проходящей через единицу изотермической поверхности в единицу времени, при условии, что градиент температуры равен 1 град/м.

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром и зависит от химической природы вещества и его физического состояния (плотности, влажности, давления, температуры).

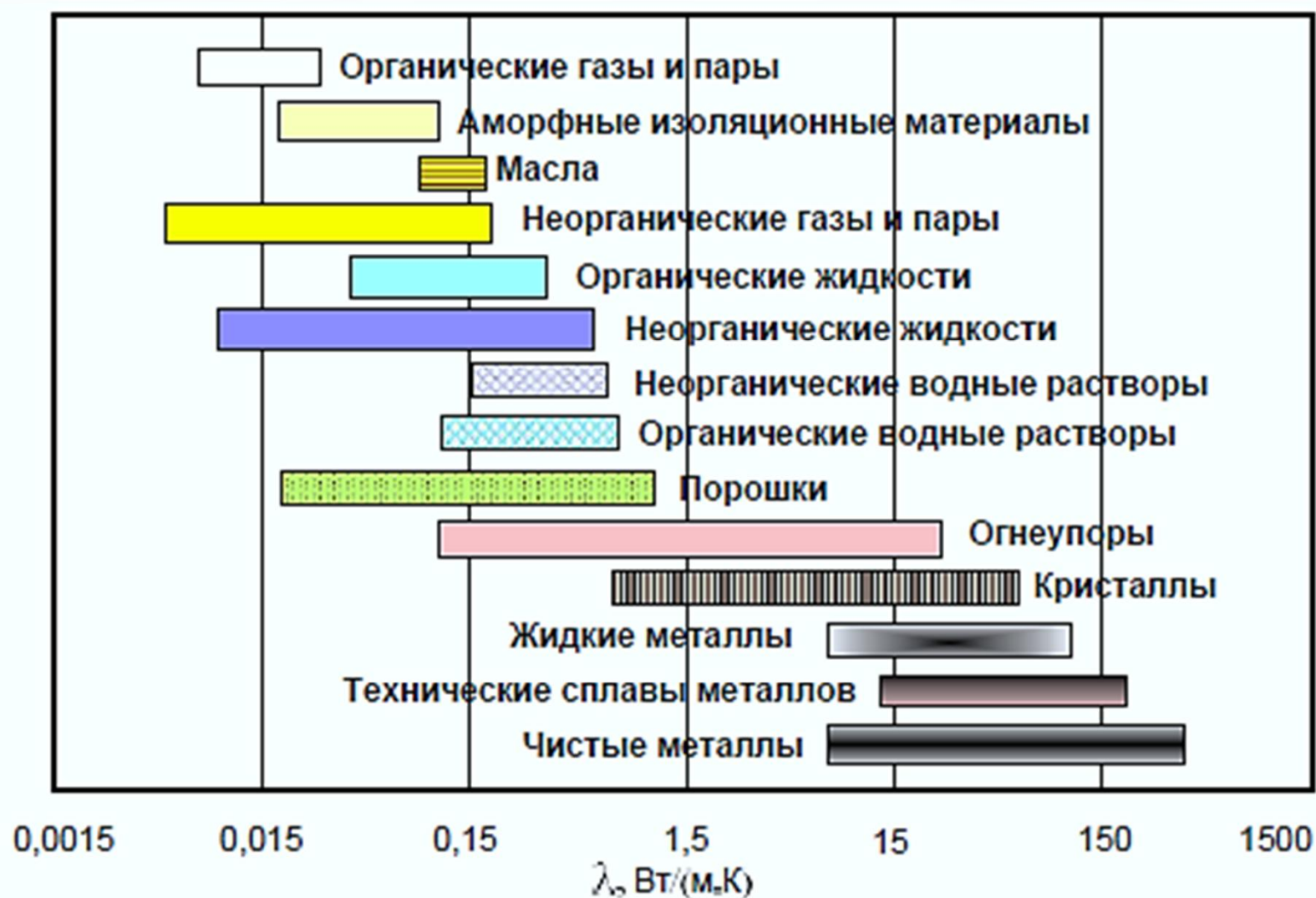


Рисунок 2.1 - Значения коэффициентов теплопроводности различных веществ

2.2 Дифференциальное уравнение теплопроводности

Дифференциальное уравнение теплопроводности (уравнение Фурье) нестационарного температурного поля

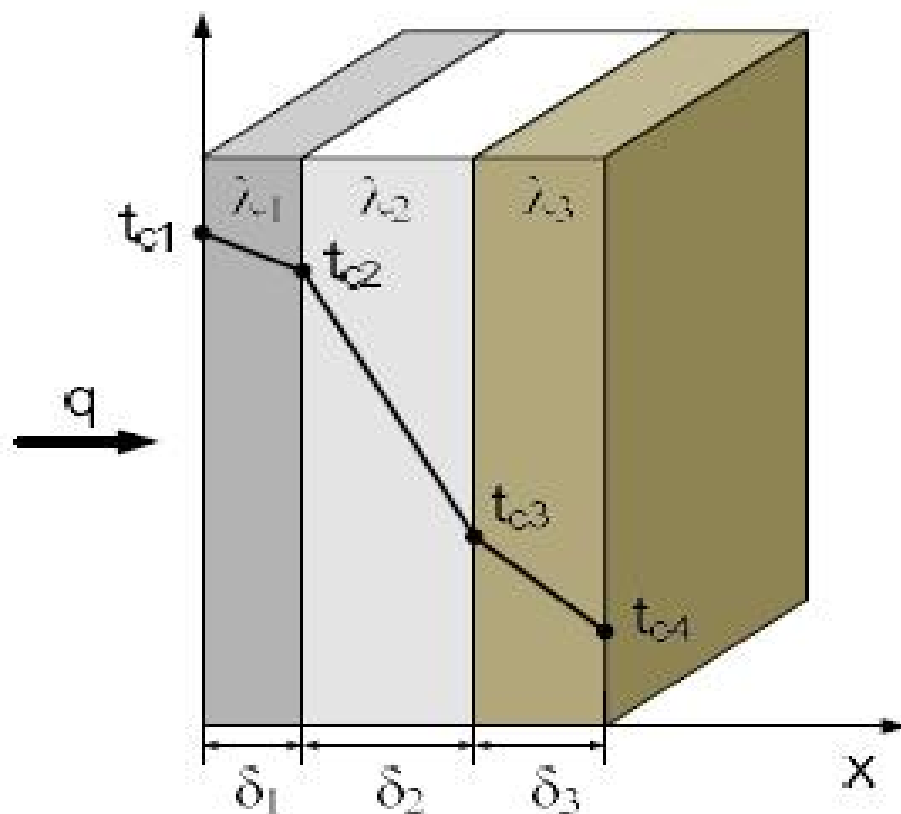
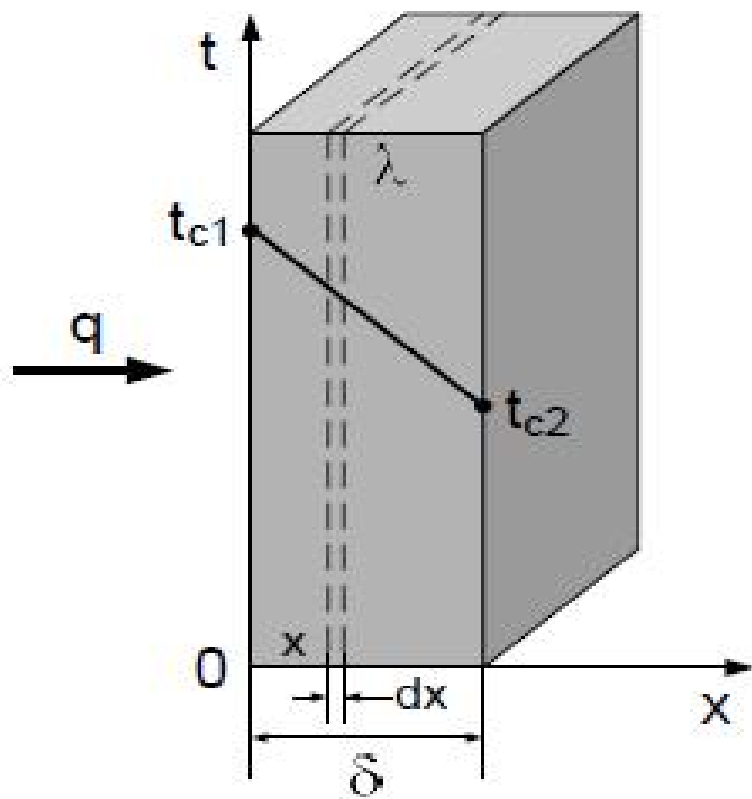
$$\frac{\partial t}{\partial t} = a \Delta t$$

где $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности тела, м²/с.

Это физическая величина, характеризующая скорость изменения температуры в теле и его теплофизические свойства. Зависит от природы вещества и его физического состояния.

2.3 Теплопроводность при стационарном режиме

Теплопроводность плоской стенки



Поверхностная плотность теплового потока:

$$q = - \lambda \frac{dt}{dx} = \lambda \frac{(t_{c1} - t_{c2})}{d}$$

$$q = \frac{Dt}{d} = \frac{Dt}{R_l}$$

$$Dt = t_{c1} - t_{c2}$$

$R_l = d / \lambda$ - внутреннее термическое
сопротивление теплопроводности стенки,
(м²·К)/Вт.

Распределение температур в плоской
однородной стенке - линейное.

Тепловой поток (мощность теплового потока) :

$$Q = q \times F = (t_{c1} - t_{c2}) \times F \times \lambda / d$$

Рассмотрим для тех же условий многослойную плоскую стенку с толщиной слоев d_1, d_2, \dots, d_n и соответствующими коэффициентами теплопроводности $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Здесь слои плотно прилегают друг к другу.

Плотность теплового потока многослойной плоской стенки:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c(n+1)}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} = \frac{Dt}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}}$$

где n - число слоев многослойной стенки;

t_{c1} и $t_{c(n+1)}$ - температуры на внешних границах многослойной стенки;

$\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}$ - полное термическое сопротивление многослойной плоской стенки.

Плотность теплового потока, проходящего через все слои, в стационарном режиме одинакова. Коэффициент теплопроводности λ различен, то для плоской многослойной стенки распределение температур - ломанная линия.

Для k -го слоя температуру на границе любого слоя можно записать:

$$t_{c(k+1)} = t_{c1} - q \sum_{i=1}^k R_{li}$$

3 КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

3.1 Основные определения конвективного теплообмена

Конвективный теплообмен – это процесс переноса теплоты в жидкой и газообразной среде с неоднородным распределением температуры, осуществляемый конвекцией.

Конвекция происходит за счет перемещения макроскопических элементов среды.

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и омывающей ее жидкостью или газом называется **теплоотдачей**.

Поверхность твердого тела, через которую переносится теплота, называется **поверхностью теплообмена**.

Теплоноситель – это жидкая или газообразная среда, омывающая поверхность теплообмена.

3.2 Виды конвективного теплообмена

Естественная конвекция - свободное движение, происходящее вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости, находящихся в поле действия сил тяжести.

Она тем сильнее, чем больше разность температур между поверхностью теплообмена и жидкостью ($\Delta t = t_c - t_{ж}$) и температурный коэффициент объемного расширения:

$$b = \frac{1}{\nu} \frac{\alpha \rho \nu}{\rho \beta T} \frac{\Delta t}{\rho_{p=const}}$$

где $n=1/\nu$ - удельный объем жидкости.

Вынужденная конвекция создается внешним источником (насосом, вентилятором, ветром). Вынужденная конвекция тем интенсивнее, чем больше скорость вынужденного движения.

3.3 Режимы течения и пограничный слой

Интенсивность конвективного теплообмена сильно зависит от режима течения омывающей жидкости.

Различают три режима течения :

- ☀- ламинарный
- ☀- переходный
- ☀- турбулентный

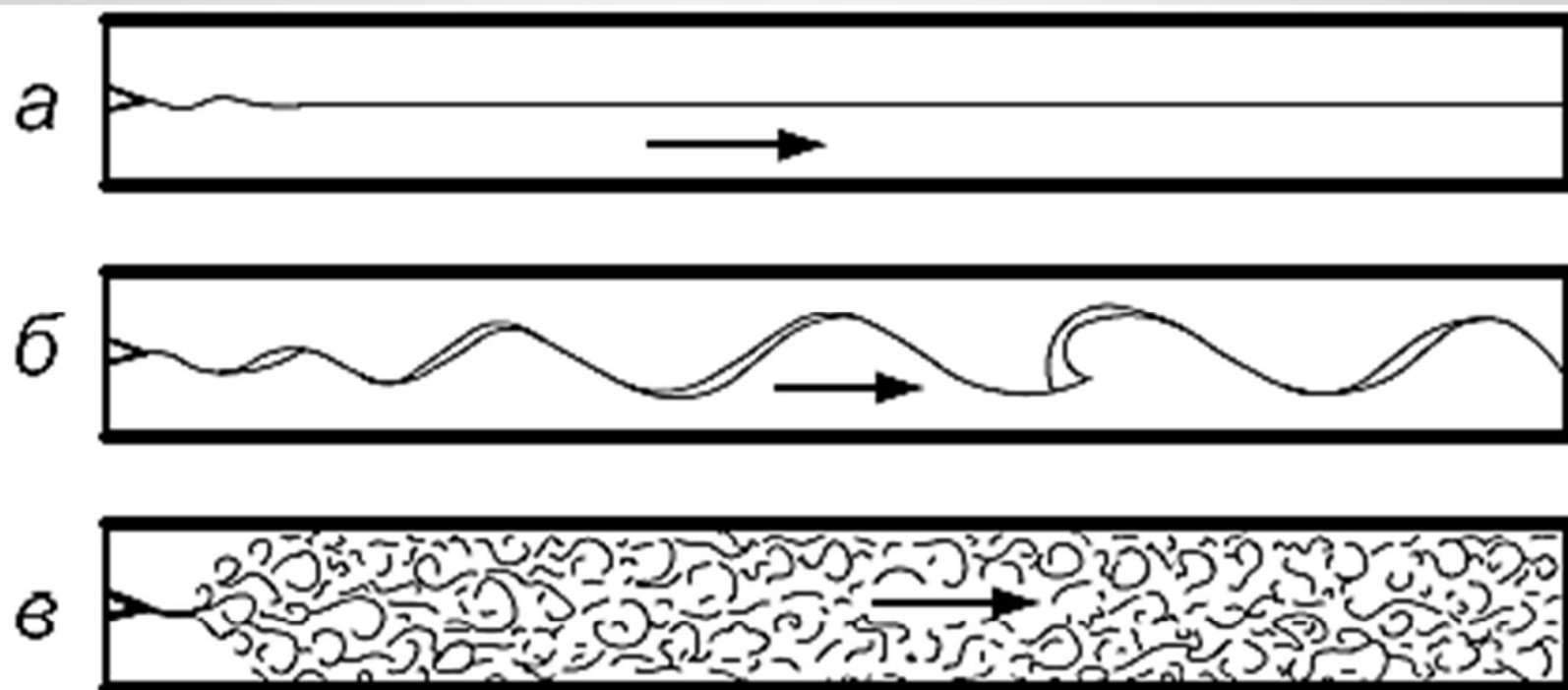


Рисунок 3.1 - Характер, движения жидкости в трубе:

а) ламинарный режим; б) переходный режим; в) турбулентный режим

Режим течения характеризуется критерием Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$$

где w – скорость движения жидкости, м/с;

l – характерный размер канала или обтекаемой стенки, м;

ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Ламинарный режим характеризуется спокойным послойным движением частиц жидкости, без перемешивания

$$Re < Re_{крI}$$

При **турбулентном режиме** – течение жидкости вихревое, с непрерывным перемешиванием всех слоев

$$Re > Re_{крII}$$

где $Re_{крI}$ и $Re_{крII}$ – критические числа Рейнольдса.

Переходным называется режим движения жидкости, промежуточный между ламинарным и турбулентным. Интервал существования переходного режима ограничивается критическими значениями $Re_{крI}$ и $Re_{крII}$.

Пограничный слой

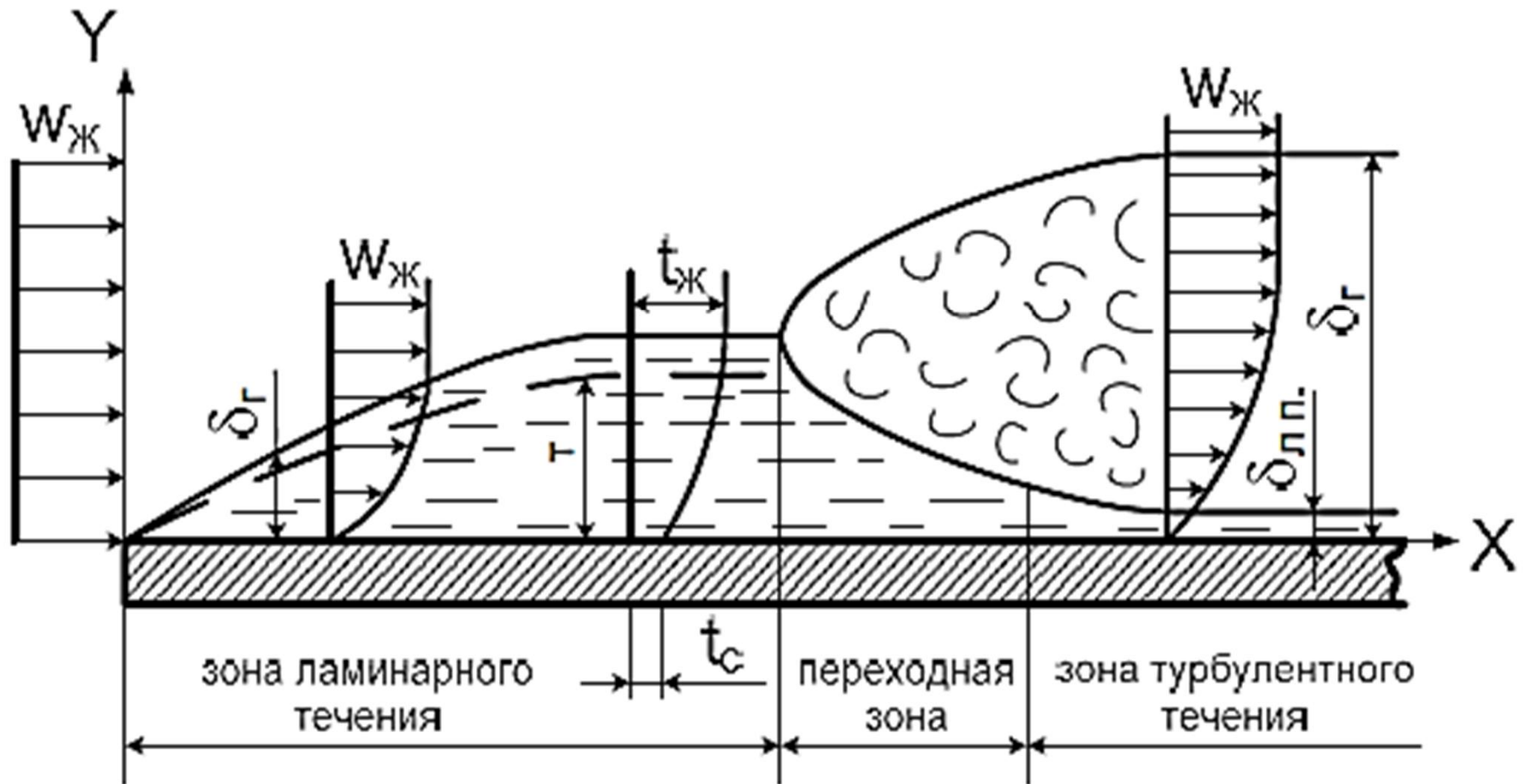


Рисунок 3.2. Образование пограничного слоя при продольном омывании плоской поверхности

3.4 Закон Ньютона-Рихмана

Для пограничного слоя:

$$Q = - \lambda \cdot F \cdot \text{grad } t = \lambda / d_T \cdot F \cdot (t_c - t_{ж})$$

Закон Ньютона-Рихмана:

Тепловой поток Q , Вт, в процессе теплоотдачи пропорционален площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности стенки t_c и жидкости $t_{ж}$:

$$Q = a \cdot F \cdot (t_c - t_{ж})$$

Коэффициент теплоотдачи α – это количество теплоты, передаваемое в единицу времени через единицу площади поверхности при разности температур поверхности и жидкости в один градус, Вт/(м²·К).

Характеризует интенсивность процесса теплоотдачи и зависит от физических свойств жидкости и характера ее движения.

3.5 Факторы, влияющие на интенсивность конвективного теплообмена

1. Режим течения и ламинарный подслой.
2. Направление теплового потока.
3. Форма и размеры поверхности теплообмена.
4. Теплофизические свойства жидкости.
5. Вид конвективного теплообмена.