



# **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

доцент, к.т.н. Пирогова  
Ольга Владимировна

# Тепловые процессы

- **Тепловые процессы** – это технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода тепла.

- Скорость тепловых процессов:

$$j_T = \frac{dQ}{dF d\tau} = \frac{\Delta t}{R_T} = K_T \cdot \Delta t_{cp}$$

- Перенос тепла осуществляется самопроизвольно от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой.

- К тепловым процессам относятся:

- нагревание (кипение);
- охлаждение (конденсация);
- выпаривание.

$$F = \frac{Q_\tau}{k_T \cdot \Delta t_{cp}}$$

- Аппараты для осуществления тепловых процессов - теплообменники.

# Виды переноса тепла

## ***Простые:***

- теплопроводность;
- тепловая конвекция;
- тепловое излучение.

***Сложные*** (перенос тепла несколькими простыми способами одновременно):

***Конвективный теплообмен*** – совместный перенос тепла теплопроводностью и конвекцией (*теплопередача и теплоотдача*).

# Теплопроводность (кондуктивность)

- **Теплопроводность** – перенос тепла хаотически движущимися микрочастицами (молекулами, атомами, электронами), непосредственно соприкасающимися друг с другом.
- Это основной вид распространения тепла в твердых веществах и тонких плёнках газов (паров) или жидкостей, граничащих с твёрдыми телами.
- Основной закон теплопроводности – закон Фурье:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn} \cdot dF \cdot d\tau$$

- количество тепла, переданного теплопроводностью, пропорционально градиенту температуры, времени и площади сечения, перпендикулярного направлению теплового потока.

- $\lambda$  [Вт/град·м] – коэффициент теплопроводности, показывает, какое количество тепла проходит вследствие теплопроводности через  $1 \text{ м}^2$  поверхности за единицу времени при разности температур в  $1$  градус, приходящейся на  $1 \text{ м}$  нормали к изотермической поверхности.
- газы – (0,005-0,5)
- жидкости – (0,08–0,7)
- теплоизоляция – (0,02-3,0)
- металлы – (2,3-458)
- графен - 5000

# Дифференциальное уравнение теплопроводности

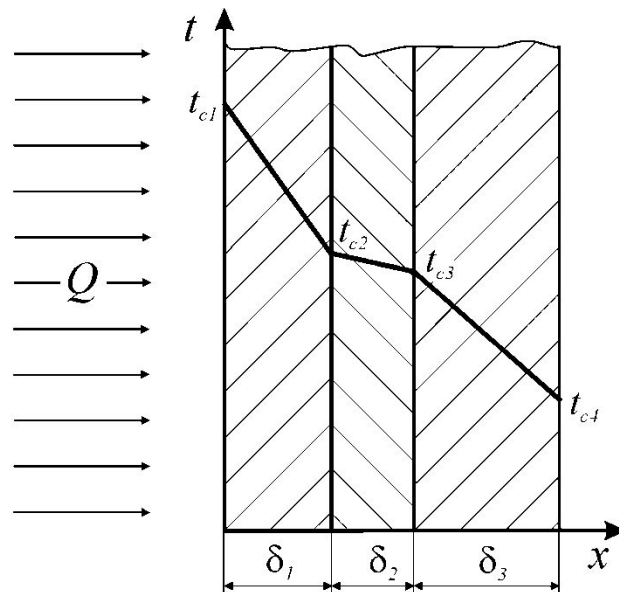
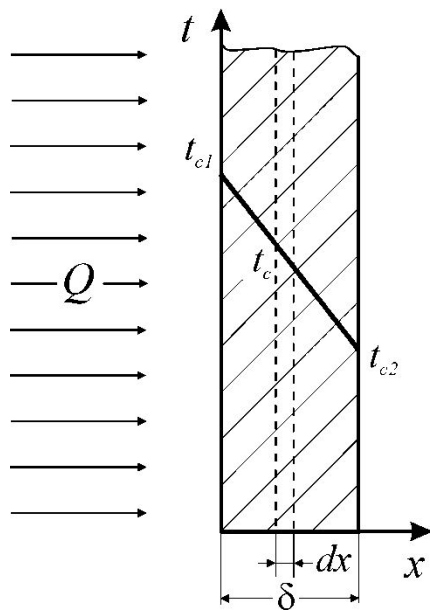
**Выводится на основании закона сохранения энергии.**

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

**$\rho$  - плотность среды, кг/м<sup>3</sup>**

**$c$  – теплоемкость среды, Дж/кг·град**

# Теплопроводность плоской однослойной и многослойной стенки



- плоской стенки  $Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) F \tau$

- многослойной стенки

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)} (t_{c1} - t_{c2}) F \tau$$

# Тепловая конвекция

- **Тепловая конвекция** – перенос тепла конечными объёмами при движении потоков жидкости и газа.

Бывает:

- **Естественная** – возникает в следствии разности плотностей в разных точках неравномерно нагретой жидкости или газа.
- **Вынужденная** – возникает в результате движения жидкости или газа под действием внешнего источника энергии.



# Тепловое излучение

- **Тепловое излучение** – это процесс распространения тепла в пространстве за счёт электромагнитных волн.

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

- $Q_A$  – количество тепла, которое превращается в тепловую энергию;
- $Q_R$  – количество тепла, которое отражается от поверхности тела;
- $Q_D$  – количество тепла, которое проходит сквозь тело.

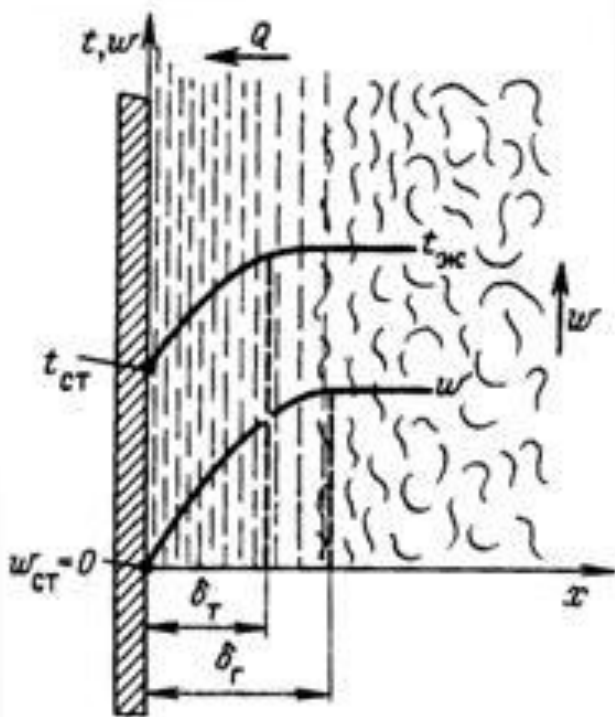
$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = 1$$

# Конвективный теплообмен

- **Теплоотдача** – перенос тепла от поверхности твёрдого тела к жидкости (газу) за счёт теплопроводности и от пограничного слоя в ядро потока жидкости (газа) конвекцией.
- Основной закон теплоотдачи – **закон Ньютона**:

Количество тепла, переданное от теплообменной поверхности к окружающей среде (или от окружающей среды к теплообменной поверхности), прямо пропорционально поверхности теплообмена, разности температур поверхности и окружающей среды, времени, в течение которого осуществлялся контакт.

$$dQ = \alpha(t_c - t_{\text{я}})dF d\tau$$



$$Q = \alpha(t_c - t_{\text{я}})F\tau$$

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  
Вт/м<sup>2</sup>град

$\alpha$ - зависит от режима движения среды, ее физических параметров, формы и размеров теплообменной поверхности.

Необходимо уравнение, которое свяжет коэффициент теплоотдачи с переменными, выражающими условия конвективного теплообмена.

Этим уравнением является дифференциальное уравнение конвективного переноса тепла, дополненное уравнением, характеризующим условия на границе раздела фаз.

- Дифференциальное уравнение конвективного теплопереноса (Фурье-Кирхгофа)

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

- Уравнение, характеризующее условия на границе раздела фаз

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_c - t_{\text{я}})$$

- Уравнения подобия конвективного переноса тепла:

- число Нуссельта  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$

- число Фурье  $Fo = \frac{a\tau}{l^2}$

- число Пекле  $Pe = \frac{wl}{a}$

$$Pe = \frac{wl}{a} \cdot \frac{v}{v} = Re \cdot Pr$$

- число Прандтля  $Pr = \frac{v}{a} = \frac{\mu}{\rho a}$

- число Рейнольдса (для вынужденной конвекции)

$$Re = \frac{wl\rho}{\mu}$$

- Число Грасгофа (для естественной конвекции)

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t$$

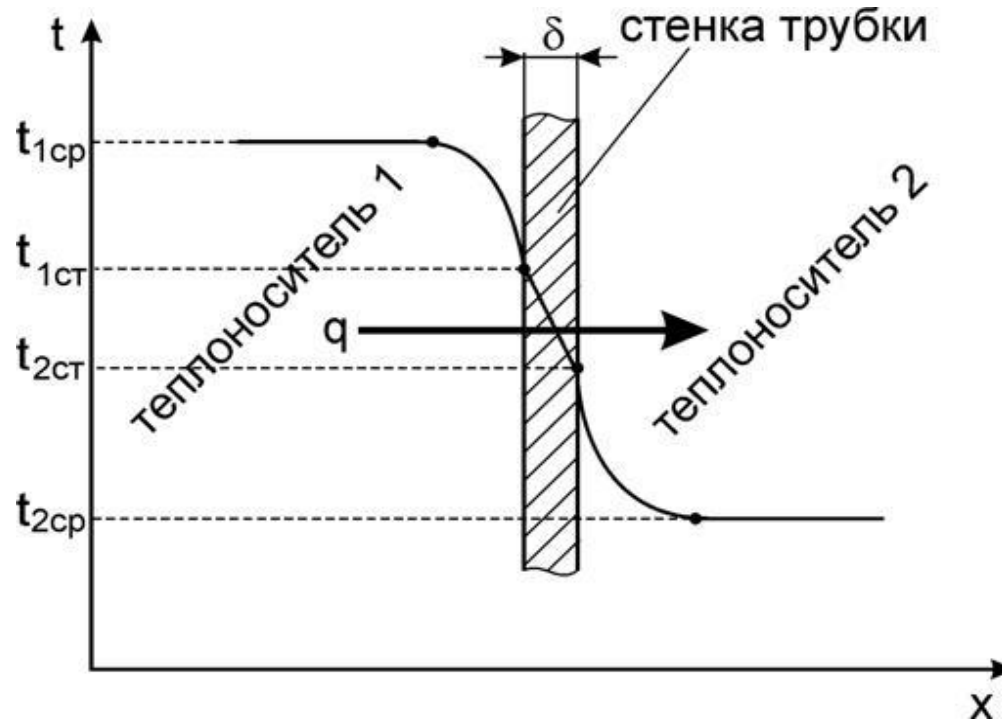
$$Nu = f(fo, Re, Gr, Pr)$$

$$Nu = A Re^n Pr^m$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

# Теплопередача

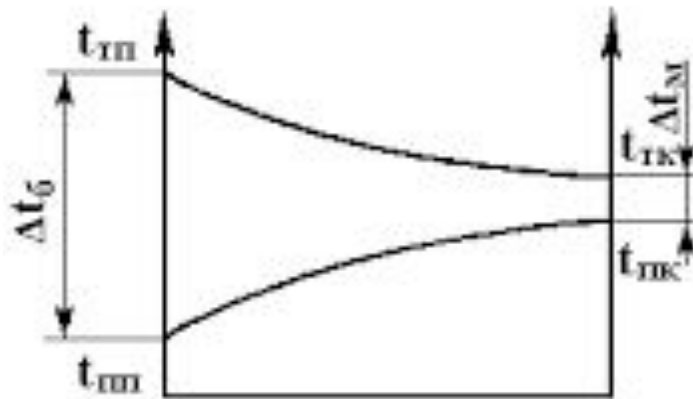
- - передача тепла от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку.



$$Q = K_T \Delta t_{cp} F$$

$$K_T = \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}$$

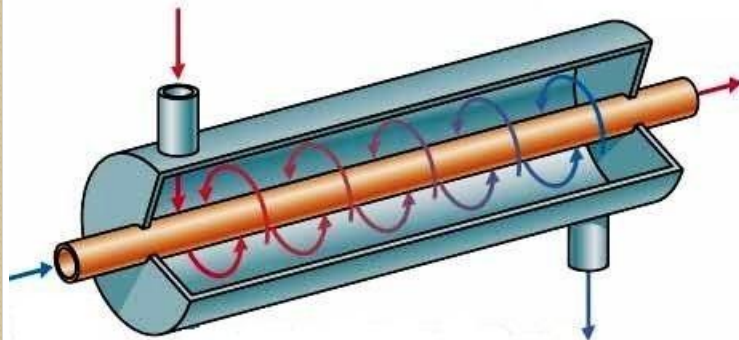
# Движущая сила тепловых процессов



а



б



если  $\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} \leq 2$ , то  $\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2}$

если  $\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} > 2$ , то  $\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}$

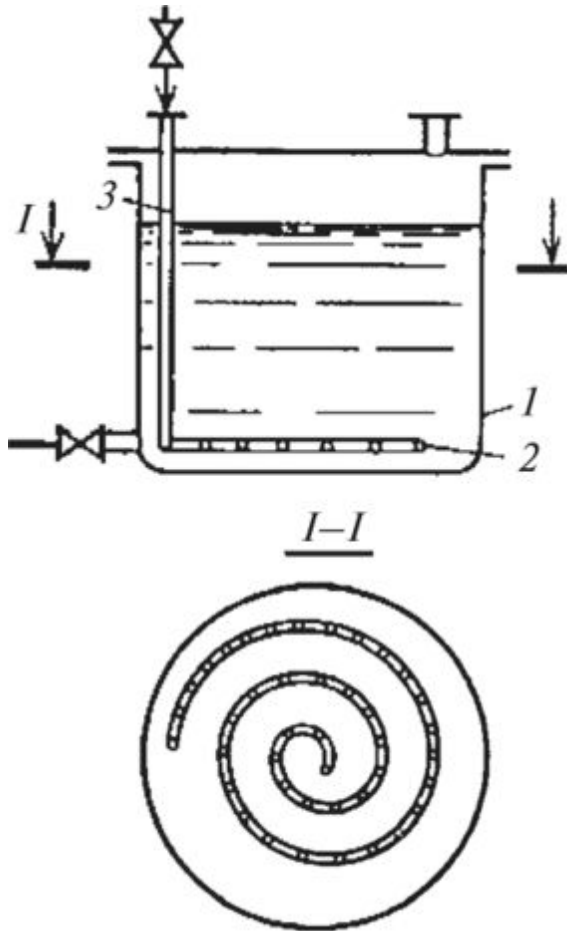
# Нагревание

- - процесс повышения температуры продуктов путем подвода к ним тепла.
- Способы нагрева:
  - водяным паром;
  - топочными газами;
  - промежуточным теплоносителем;
  - электрическим током.



# Нагревание водяным паром

## Нагревание «острым» паром



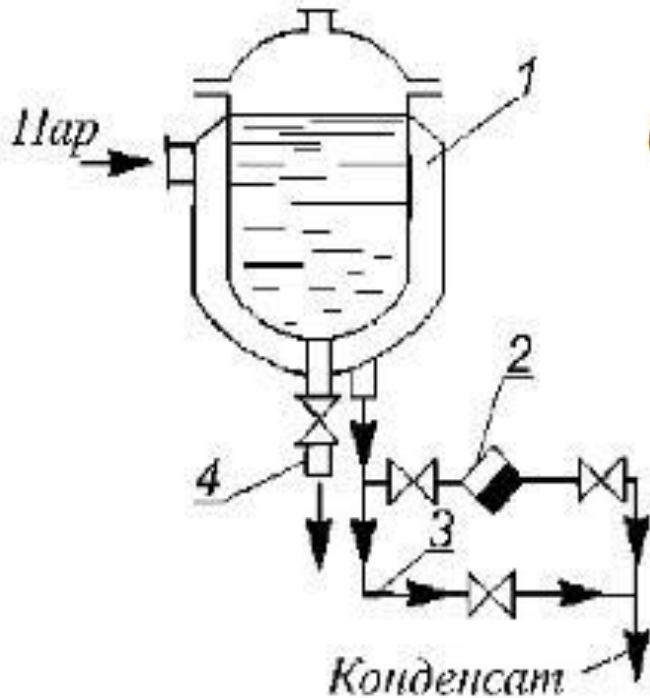
Тепловой баланс (ТБ):

$$Gc_B t_H + DH = (G + D)c_B t_K + Q_{\Pi}$$

Расход пара:

$$D = \frac{Gc_B(t_K - t_H)}{H - c_B t_K}$$

# Нагревание «глухим» паром



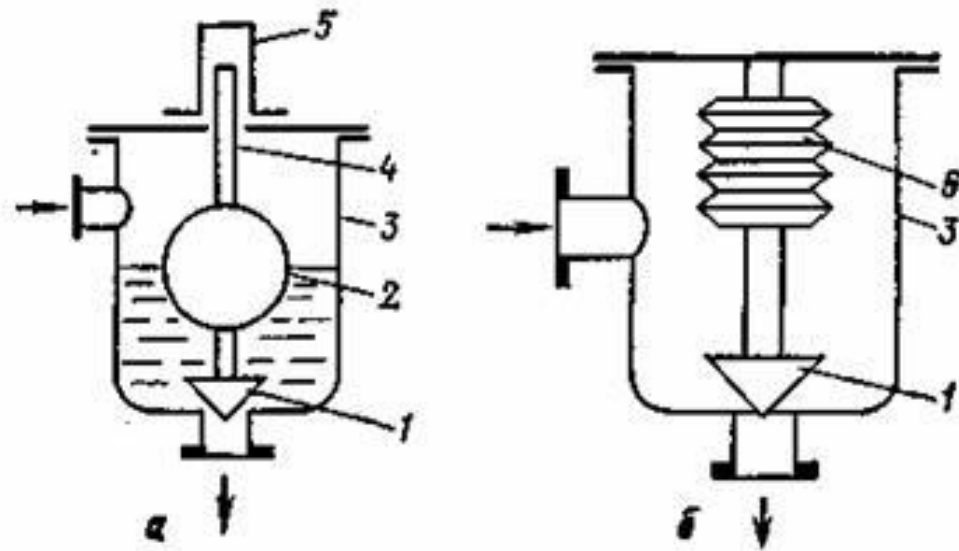
ТБ:

$$Gc_{\text{ж}}t_{\text{H}} + DH = Gc_{\text{ж}}t_{\text{K}} + Dc_{\text{B}}t_{\text{B}} + Q_{\text{П}}$$

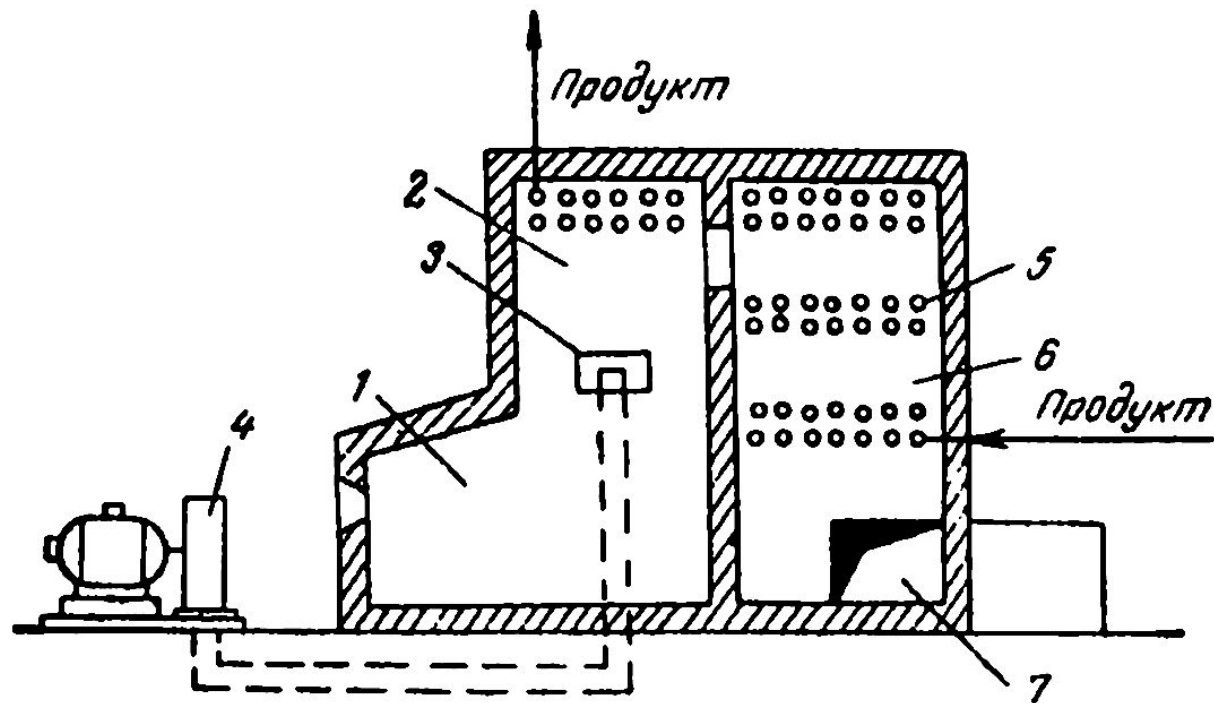
Расход пара:

$$D = \frac{Gc_{\text{ж}}(t_{\text{K}} - t_{\text{H}})}{H - c_{\text{B}}t_{\text{B}}}$$

# Конденсатоотводчики



# Нагревание топочными (дымовыми) газами



$$Gc_{\text{Ж}}t_{\text{Н}} + Q_0 = Gc_{\text{Ж}}t_{\text{К}} + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{\text{П}}$$