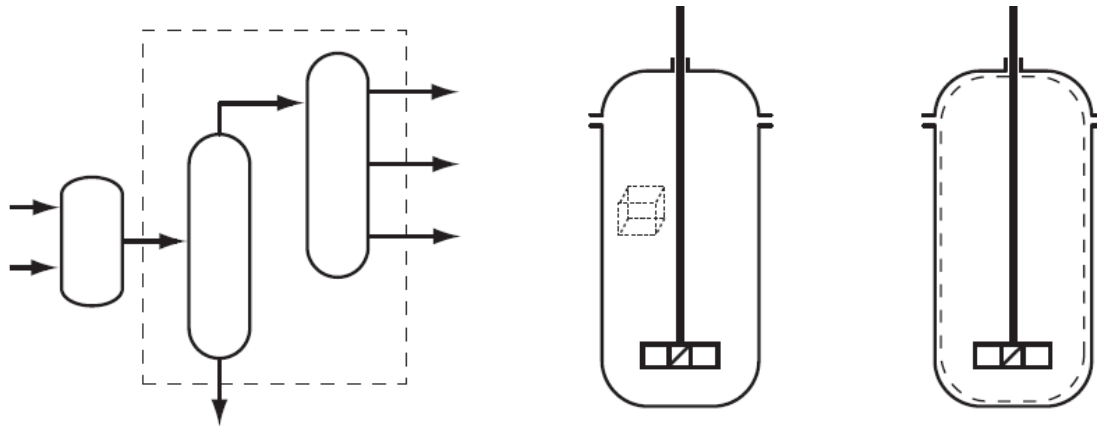


**Otázky**  
**Chemické inženýrství I**  
**ak. rok 2013/14**

1. Principy bilancování. Bilancovatelné veličiny. Pojmy: bilanční systém a jeho hranice, bilanční období, proud, složka, akumulace, zdroj, fiktivní proud, základ bilance. Sestavování bilančních vztahů, celková bilance, bilance složky, počet nezávislých bilančních vztahů. Dodatečné vztahy k bilančním rovnicím: konverze, výtěžek, přebytek složky. Matice zadání a výsledků, doporučený postup při bilancování.

$$\text{VSTUP} + \text{ZDROJ} = \text{VÝSTUP} + \text{AKUMULACE}$$



1. Principy bilancování. Bilancovatelné veličiny. Pojmy: bilanční systém a jeho hranice, bilanční období, proud, složka, akumulace, zdroj, fiktivní proud, základ bilance. Sestavování bilančních vztahů, celková bilance, bilance složky, počet nezávislých bilančních vztahů. Dodatečné vztahy k bilančním rovnicím: konverze, výtěžek, přebytek složky. Matice zadání a výsledků, doporučený postup při bilancování.

### Zlomky

$$w_i = \frac{m_i}{m} \quad x_i = \frac{n_i}{n} \quad \varphi_i = \frac{V_i}{V}$$

$$w \longrightarrow x$$

$$x \longrightarrow w$$

$$x_{ij} = \frac{\frac{w_{ij}}{M_i}}{\sum_{k=1}^N \frac{w_{kj}}{M_k}}$$

$$w_{ij} = \frac{x_{ij} M_i}{\sum_{k=1}^N x_{kj} M_k}$$

$$m = \sum_{i=1}^{N_S} m_i, \quad \sum_{i=1}^{N_S} w_i = 1$$

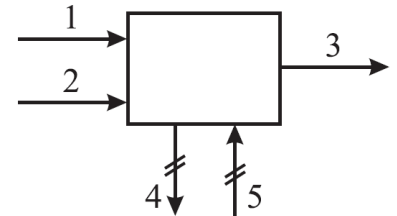
$$n = \sum_{i=1}^{N_S} n_i, \quad \sum_{i=1}^{N_S} x_i = 1$$

$$\bar{M}_j = \frac{m_j}{n_j} = \sum_{i=1}^N x_{ij} M_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{w_{ij}}{M_i}}$$

1. Principy bilancování. Bilancovatelné veličiny. Pojmy: bilanční systém a jeho hranice, bilanční období, proud, složka, akumulace, zdroj, fiktivní proud, základ bilance. Sestavování bilančních vztahů, celková bilance, bilance složky, počet nezávislých bilančních vztahů. Dodatečné vztahy k bilančním rovnicím: konverze, výtěžek, přebytek složky. Matice zadání a výsledků, doporučený postup při bilancování.

### Rozsah reakce

$$\xi = \frac{n_i - n_{i0}}{\nu_i}$$



### Konverze

$$\zeta_i = \frac{n_{i,\text{poč}} - n_{i,\text{kon}}}{n_{i,\text{poč}}}$$

### Přebytek

$$P_i = \frac{m_{i,\text{skut}} - m_{i,\text{teor}}}{m_{i,\text{teor}}} = \frac{n_{i,\text{skut}} - n_{i,\text{teor}}}{n_{i,\text{teor}}}$$

1. Principy bilancování. Bilancovatelné veličiny. Pojmy: bilanční systém a jeho hranice, bilanční období, proud, složka, akumulace, zdroj, fiktivní proud, základ bilance. Sestavování bilančních vztahů, celková bilance, bilance složky, počet nezávislých bilančních vztahů. Dodatečné vztahy k bilančním rovnicím: konverze, výtěžek, přebytek složky. Matice zadání a výsledků, doporučený postup při bilancování.

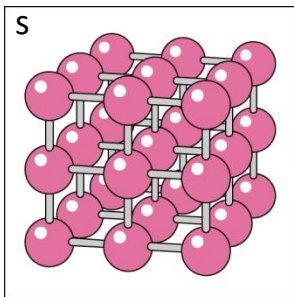
1. Nakreslení bilančního schéma, označení uzlů, proudů a složek.
2. Zápis předpokladů.
3. Zápis stechiometrických rovnic chemických reakcí.
4. Volba základu výpočtu.
5. Volba typu bilance (hmotnostní x látková).
6. Přepočet vstupních dat.
7. Zápis matice zadání.
8. Sestavení bilančních rovnic a dodatečných vztahů.
9. Řešení soustavy rovnic.
10. Kontrola správného výpočtu.

2. Tekutiny, spojité prostředí (kontinuum). Síly působící v tekutinách, tečné a normálové napětí, tlak. Newtonův zákon pro viskozitu. Ideální tekutina. Reynoldsovo kritérium. Rychlostní profil při laminárním a turbulentním proudění tekutiny trubicou. Rovnice continuity.

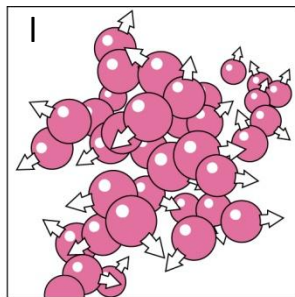
- uvažujeme izotropní spojité prostředí (neplatí pro plyny při nízkých tlacích)
- pracujeme s útvary, jejichž délkové rozměry jsou mnohem větší než je střední mezimolekulární vzdálenost
  - $10^{-8}$  m (plyny)
  - $10^{-10}$  m (kapaliny)

vzduch:

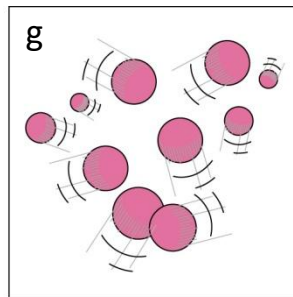
elementární objem:  $dV^* = 10^{-9} \text{ mm}^3$   
obsahuje  $3 \times 10^7$  molekul



(a)



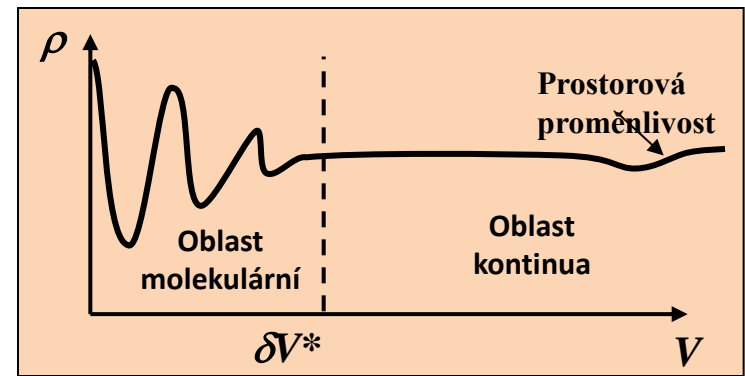
(b)



(c)

izotropní = fyzikální vlastnosti nezávisejí na směru v němž jsou měřeny

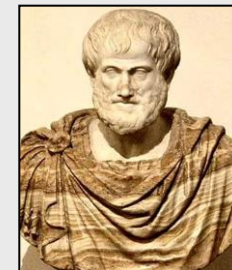
kontinuum = spojité prostředí



Základní koncept kontinua

**Aristotelés ze Stagiry**

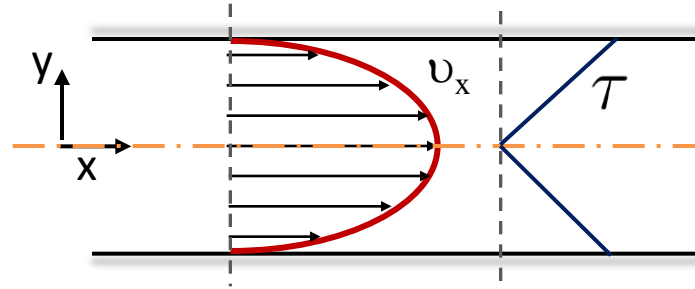
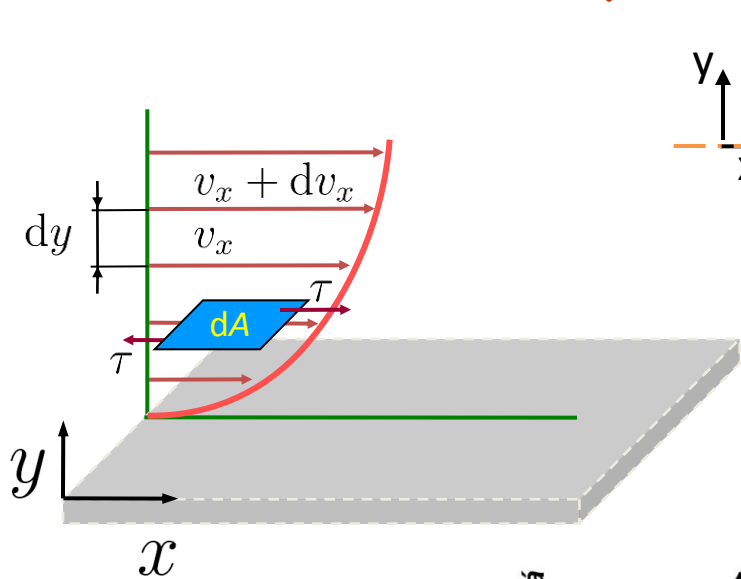
(384 – 322 př.n.l.)



- řecký filosof, žák Platónův
- vychovatel Alexandra III. Velikého

2. Tekutiny, spojité prostředí (kontinuum). Síly působící v tekutinách, tečné a normálové napětí, tlak. Newtonův zákon pro viskozitu. Ideální tekutina. Reynoldsovo kritérium. Rychlostní profil při laminárním a turbulentním proudění tekutiny trubkou. Rovnice continuity.

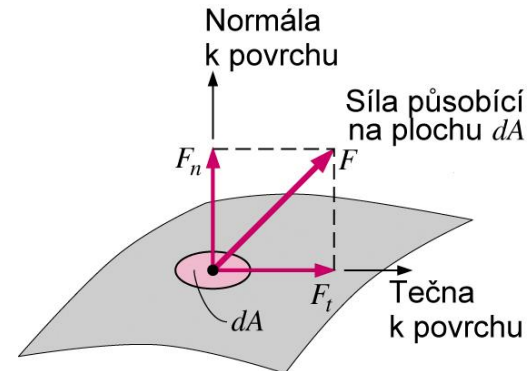
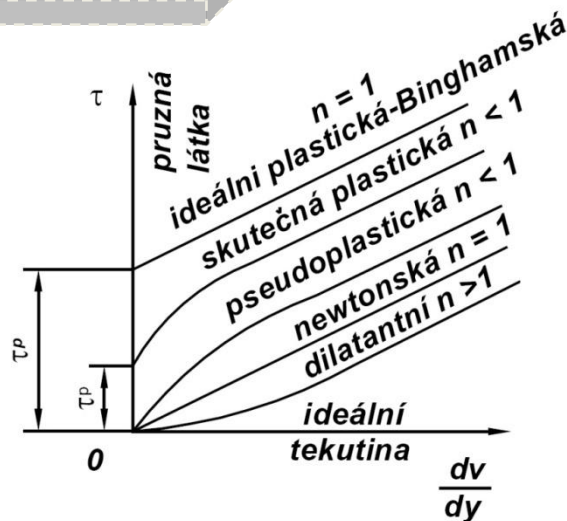
## Newtonův zákon viskozity (r. 1686)



$$\tau = -\eta \frac{dv_x}{dy}$$

konstanta úměrnosti,  
dynamická viskozita (Pa s)

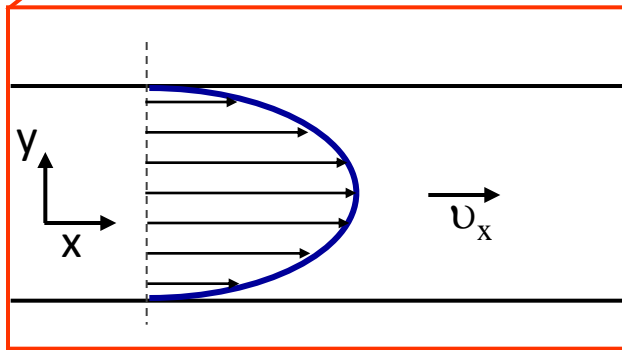
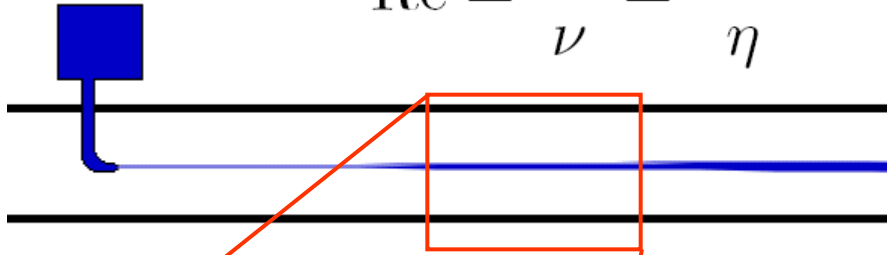
$$\text{Pa s} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{s} = \frac{\text{kg m s}^{-2}}{\text{m}^2} \text{s} = \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$$



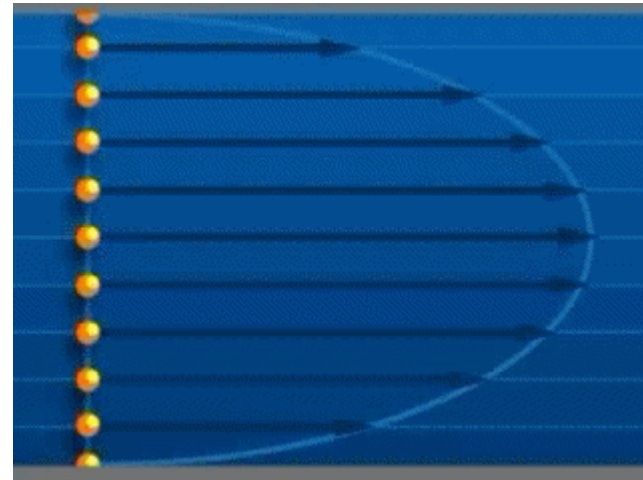
2. Tekutiny, spojité prostředí (kontinuum). Síly působící v tekutinách, tečné a normálové napětí, tlak. Newtonův zákon pro viskozitu. Ideální tekutina. Reynoldsovo kritérium. Rychlostní profil při laminárním a turbulentním proudění tekutiny trubkou. Rovnice kontinuity.

### Laminární proudění

$$Re = \frac{lv}{\nu} = \frac{lv\rho}{\eta}$$



Rychlostní profil

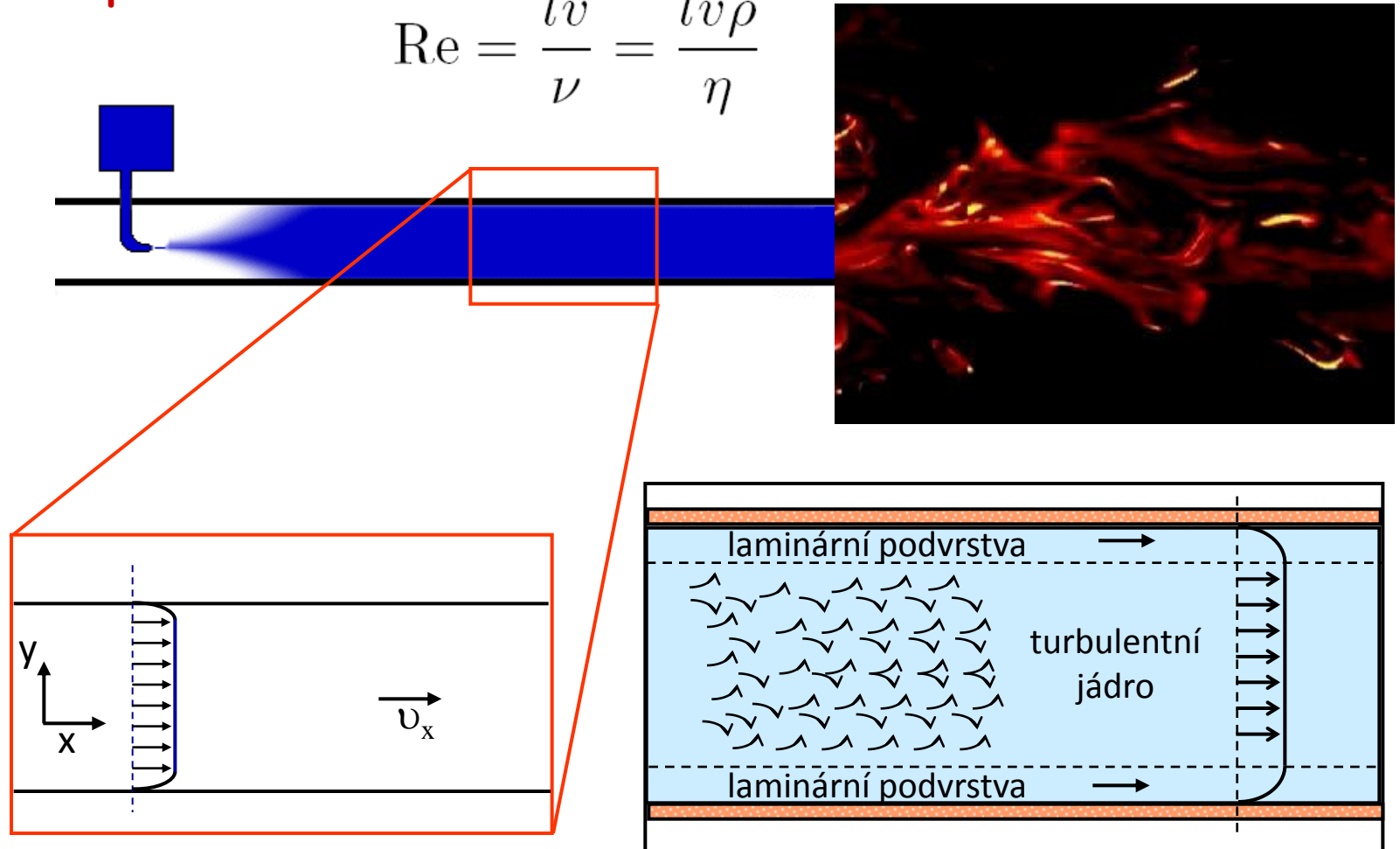




2. Tekutiny, spojité prostředí (kontinuum). Síly působící v tekutinách, tečné a normálové napětí, tlak. Newtonův zákon pro viskozitu. Ideální tekutina. Reynoldsovo kritérium. Rychlostní profil při laminárním a turbulentním proudění tekutiny trubkou. Rovnice continuity.

## Turbulentní proudění

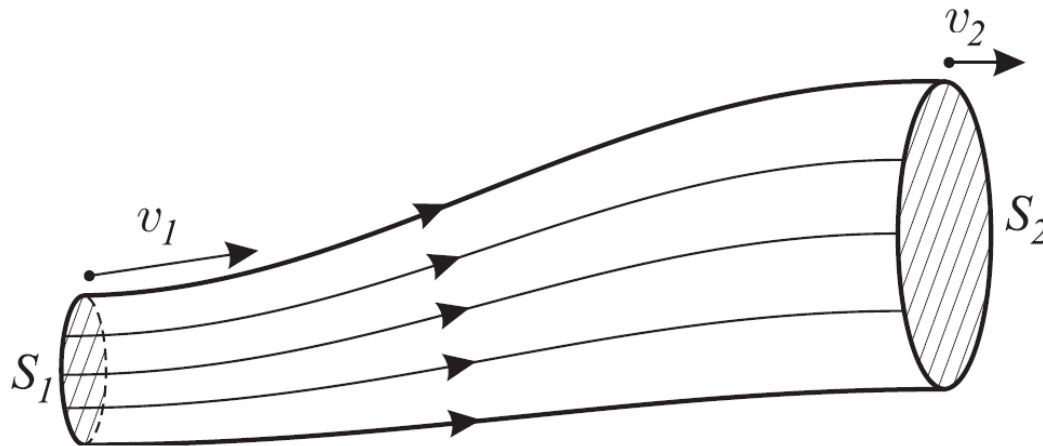
$$\text{Re} = \frac{lv}{\nu} = \frac{lv\rho}{\eta}$$



Rychlostní profil

2. Tekutiny, spojité prostředí (kontinuum). Síly působící v tekutinách, tečné a normálové napětí, tlak. Newtonův zákon pro viskozitu. Ideální tekutina. Reynoldsovo kritérium. Rychlostní profil při laminárním a turbulentním proudění tekutiny trubkou. Rovnice kontinuity.

## Rovnice kontinuity



$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$
$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$$
$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

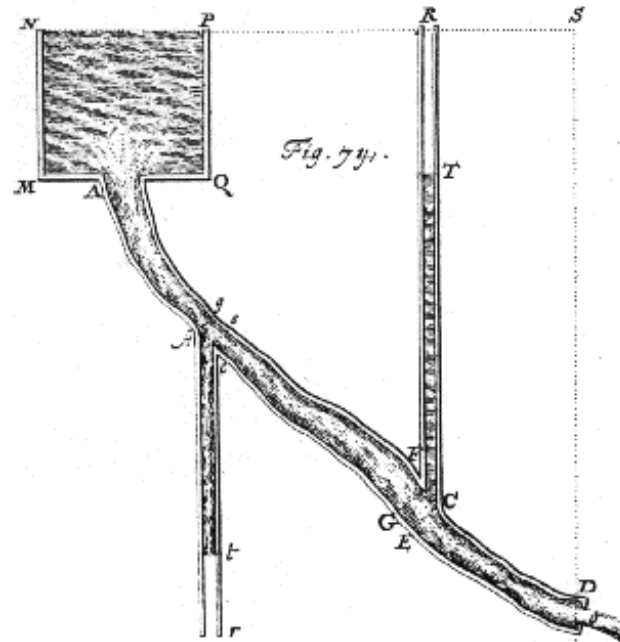
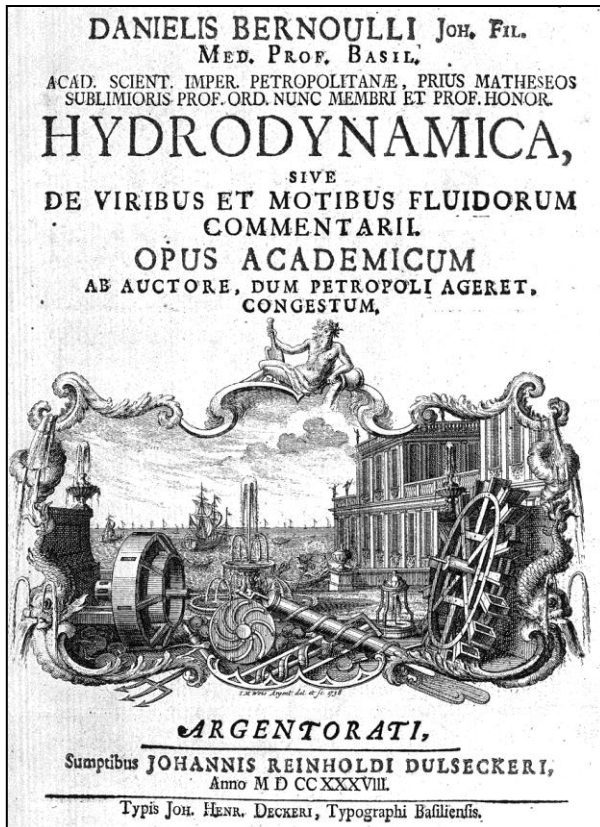
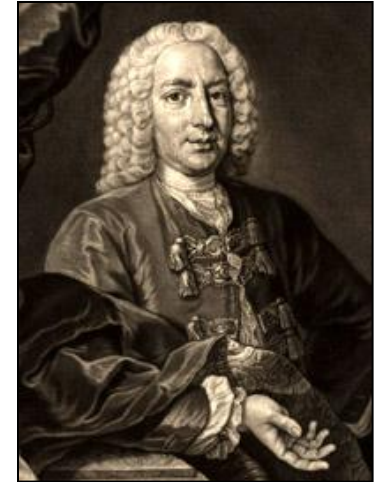
Předpoklad:

- ustálený stav
- konstantní hustota

3. Bilance mechanické energie tekutiny – Bernoulliova rovnice pro potrubí bez čerpadla i se zařazeným čerpadlem. Disipace měrné mechanické energie při proudění tekutiny potrubím. Součinitel tření – Moodyův diagram. Ekvivalentní průměr potrubí.

## Daniel Bernoulli (1700 – 1782)

- zavedl pojem „hydrodynamika“
- poprvé studoval vztah mezi tlakem a rychlostí



„když rychlost proudící tekutiny roste, klesá tlak

3. Bilance mechanické energie tekutiny – Bernoulliova rovnice pro potrubí bez čerpadla i se zařazeným čerpadlem. Disipace měrné mechanické energie při proudění tekutiny potrubím. Součinitel tření – Moodyův diagram. Ekvivalentní průměr potrubí.

### Bernoulliova rovnice

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + e_c = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + e_{dis}$$

$$e_{dis} = \left( \lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta_j \right) \frac{v^2}{2}$$

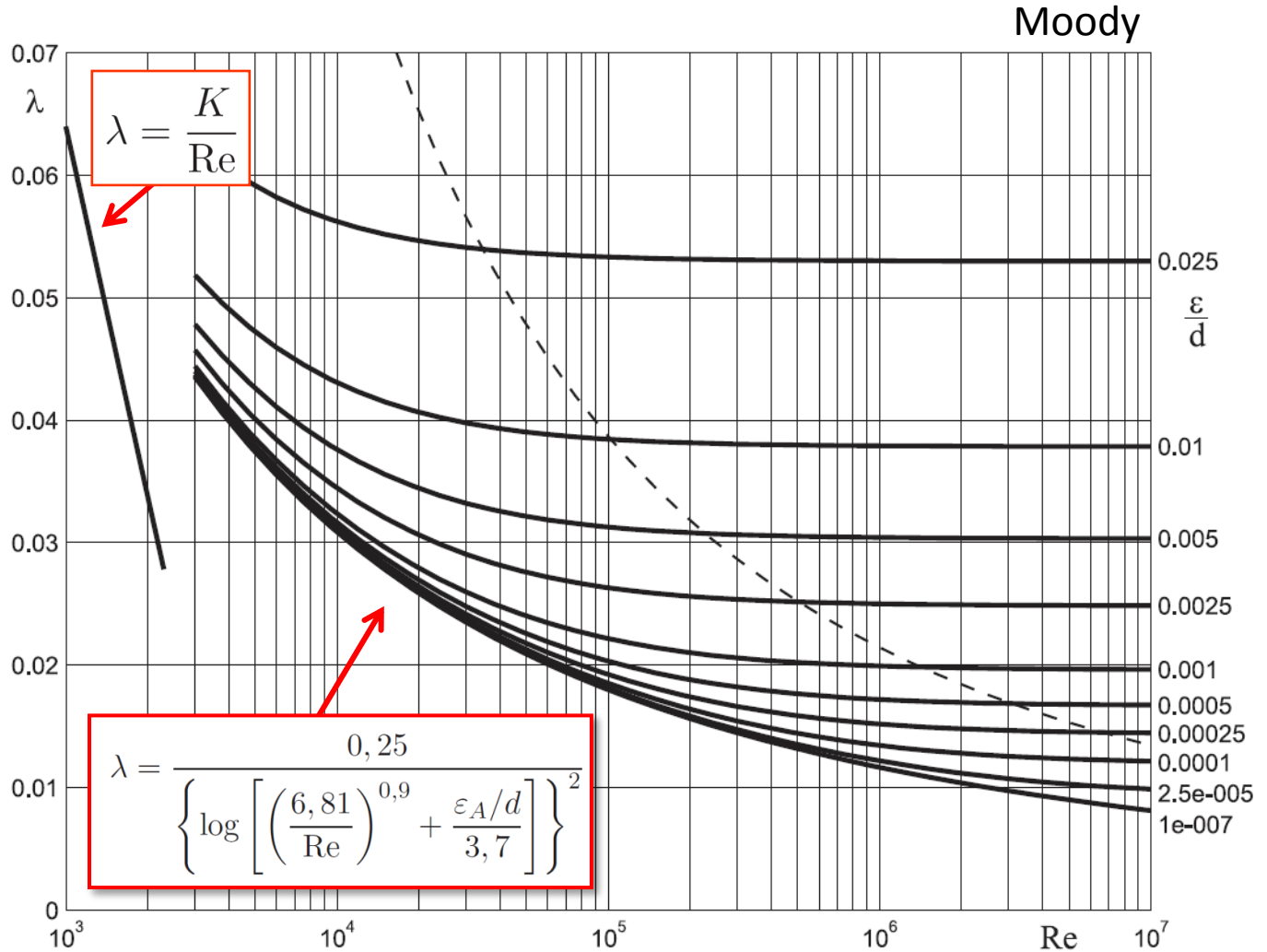


Orientační hodnoty součinitelů místních odporů pro některé armatury

zcela otevřené klínové šoupátko	0,5	zcela otevřené paralelní šoupátko	0,15
koleno 45°	0,3	paralelní šoupátko otevřené na 75%	0,9
koleno 90°	1,26	paralelní šoupátko otevřené na 50%	4,5
oblouk 90°	0,25	paralelní šoupátko otevřené na 25%	24
zcela otevřený přímý ventil	3	zcela otevřený šikmý ventil	1,6
zpětná klapka	6	výtok z potrubí	1
sací koš	6		

3. Bilance mechanické energie tekutiny – Bernoulliova rovnice pro potrubí bez čerpadla i se zařazeným čerpadlem. Disipace měrné mechanické energie při proudění tekutiny potrubím. Součinitel tření – Moodyův diagram. Ekvivalentní průměr potrubí.

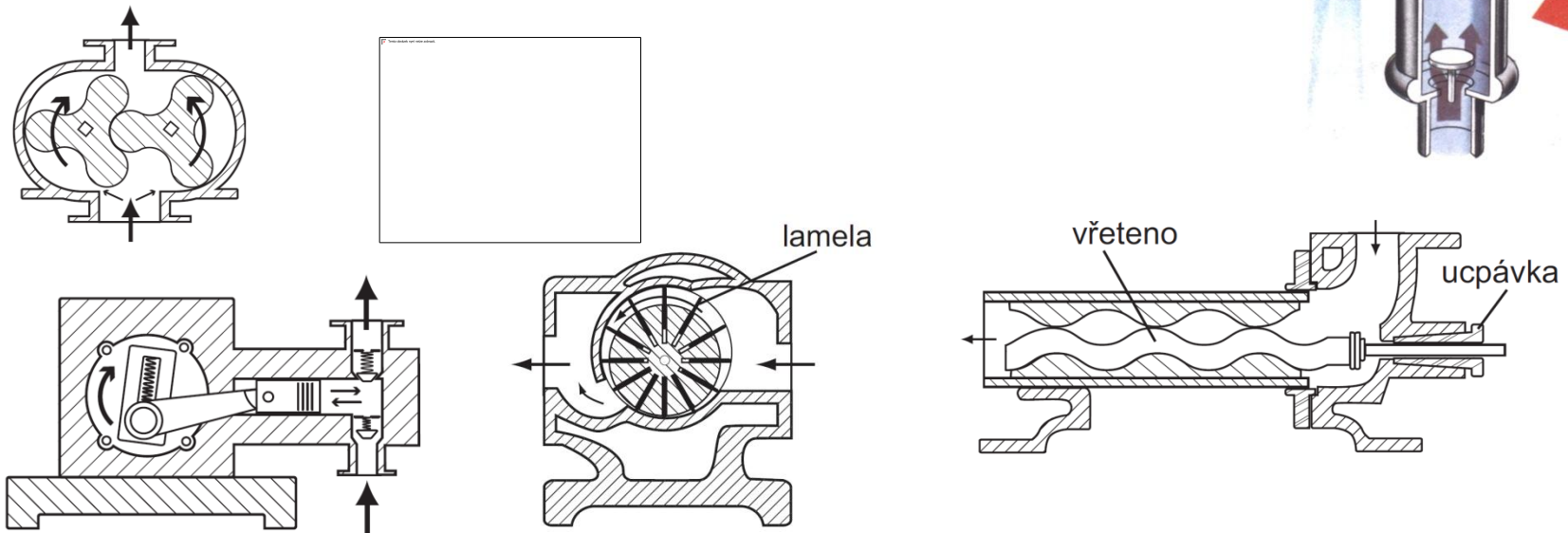
### Součinitel tření



4. Doprava tekutin. Příkon a výkon čerpadla, sací a výtlačná výška čerpadla, maximální sací výška, kavitace. Charakteristika potrubí a charakteristika odstředivého čerpadla. Pracovní bod potrubí s čerpadlem. Regulace průtoku škrcením a obtokem.

## Hydrostatická čerpadla

- zprostředkovávají přímou přeměnu mechanické energie v hydraulickou
- mechanickým tlakem pohyblivého členu na kapalinu se zvyšuje její tlaková energie přímo
- menší počet otáček  $\Rightarrow$  větší hmotnost a cena
- složitější regulace průtoku (nelze užít regulace škrcením na výtlaku)
- pro vyšší tlaky (řádově do 50 MPa) a malé průtoky

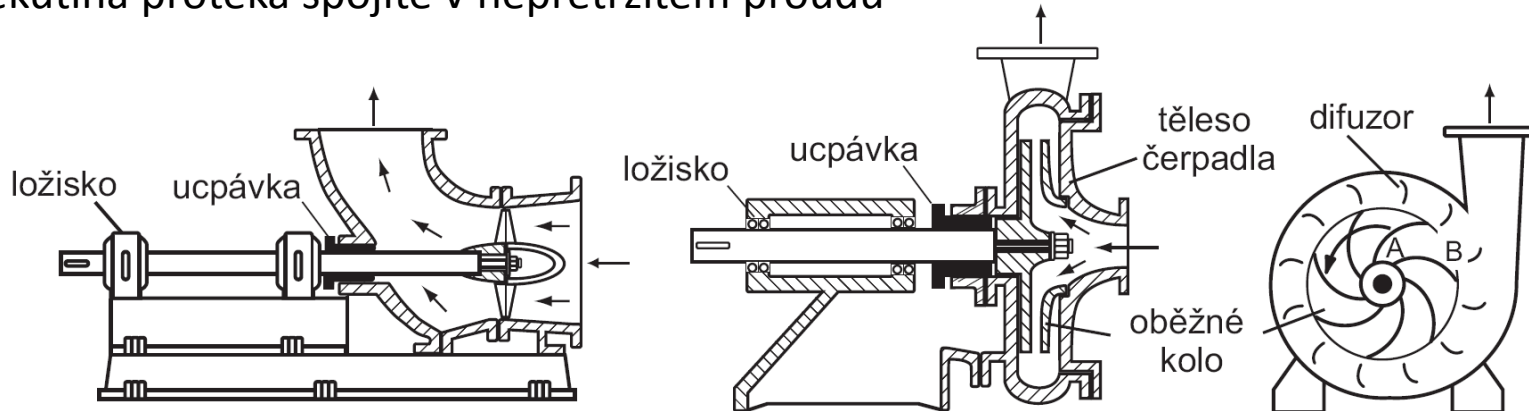




4. Doprava tekutin. Příkon a výkon čerpadla, sací a výtlačná výška čerpadla, maximální sací výška, kavitace. Charakteristika potrubí a charakteristika odstředivého čerpadla. Pracovní bod potrubí s čerpadlem. Regulace průtoku škrcením a obtokem.

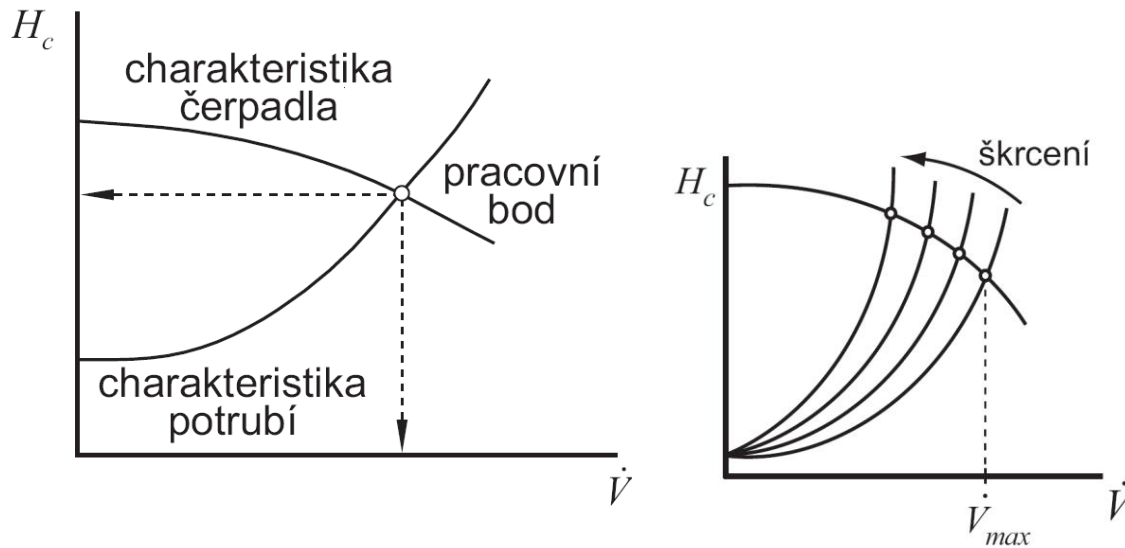
## Hydrodynamická čerpadla

- přeměna mechanické energie na energii tlakovou probíhá zprostředkovaně přes změnu kinetické energie
- hnacím motorem je dodávána mechanická práce – energie oběžnému kolu, kde se přemění na hydraulickou energii kinetickou, která se ve spirále nebo v rozváděcím kole dále přemění na hydraulickou energii tlakovou
- dvojitá přeměna má za následek nižší účinnost ve srovnání s HS čerpadly
- tekutina protéká spojitě v nepřetržitém proudu



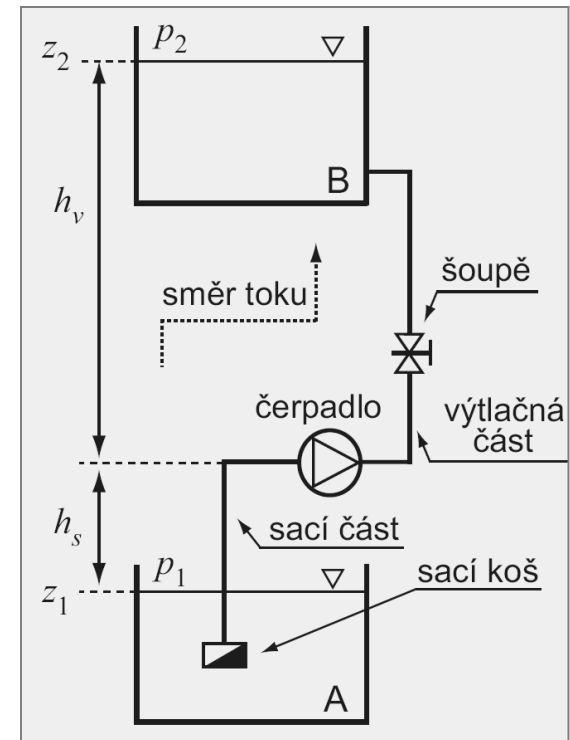
4. Doprava tekutin. Příkon a výkon čerpadla, sací a výtlačná výška čerpadla, maximální sací výška, kavitace. Charakteristika potrubí a charakteristika odstředivého čerpadla. Pracovní bod potrubí s čerpadlem. Regulace průtoku škrcením a obtokem.

$$H_c^- = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 + \left( \lambda \frac{L}{d} + \sum \zeta_j \right) \frac{8 \dot{V}^2}{\pi^2 d^4 g}$$



Maximální sací výška

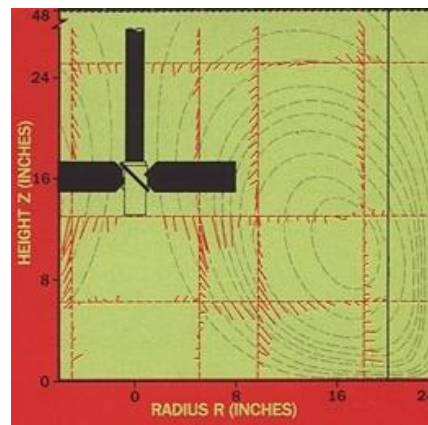
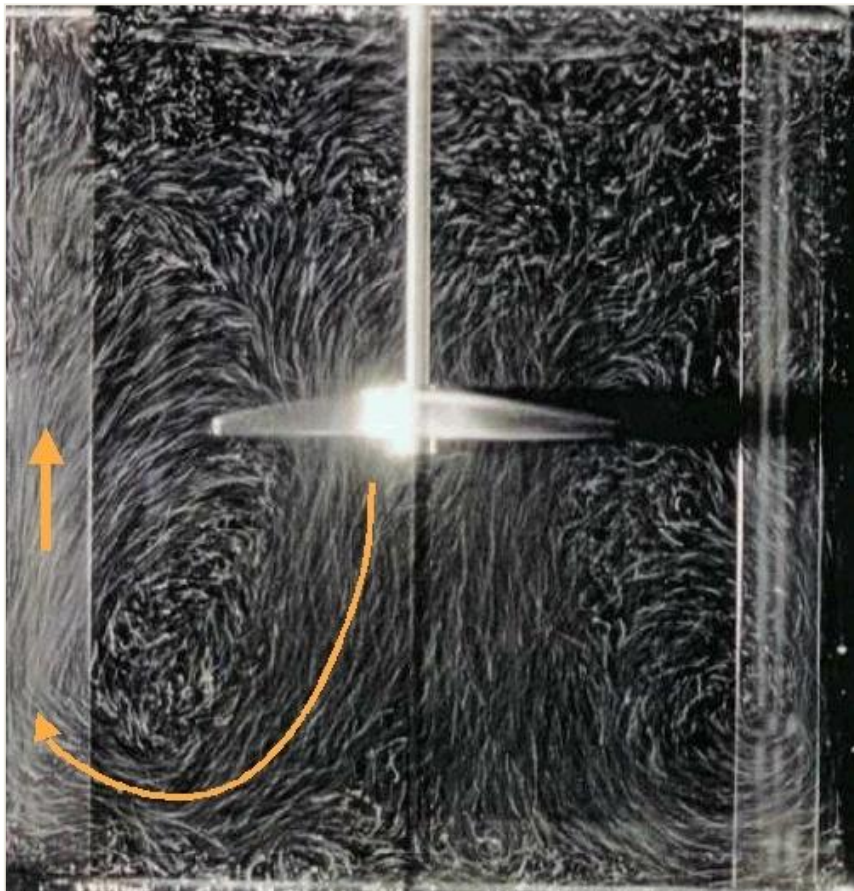
$$h_{s, max} = \frac{p_1 - p^\circ}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_s^2}{2g} - \frac{e_{dis, s}}{g}$$



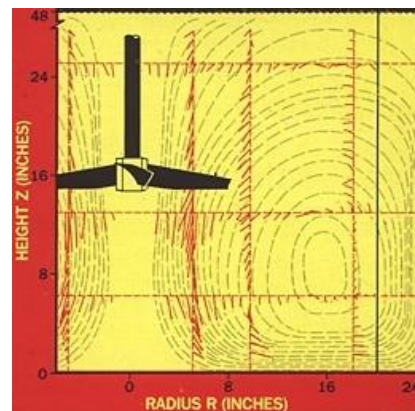


5. Míchání kapalin rotačními míchadly. Typy míchadel, míchací nádoby, význam narážek v míchacích nádobách. Reynoldsovo kritérium pro míchání. Příkonová charakteristika míchadla, určení příkonu míchadla.

## Tokové obrazy

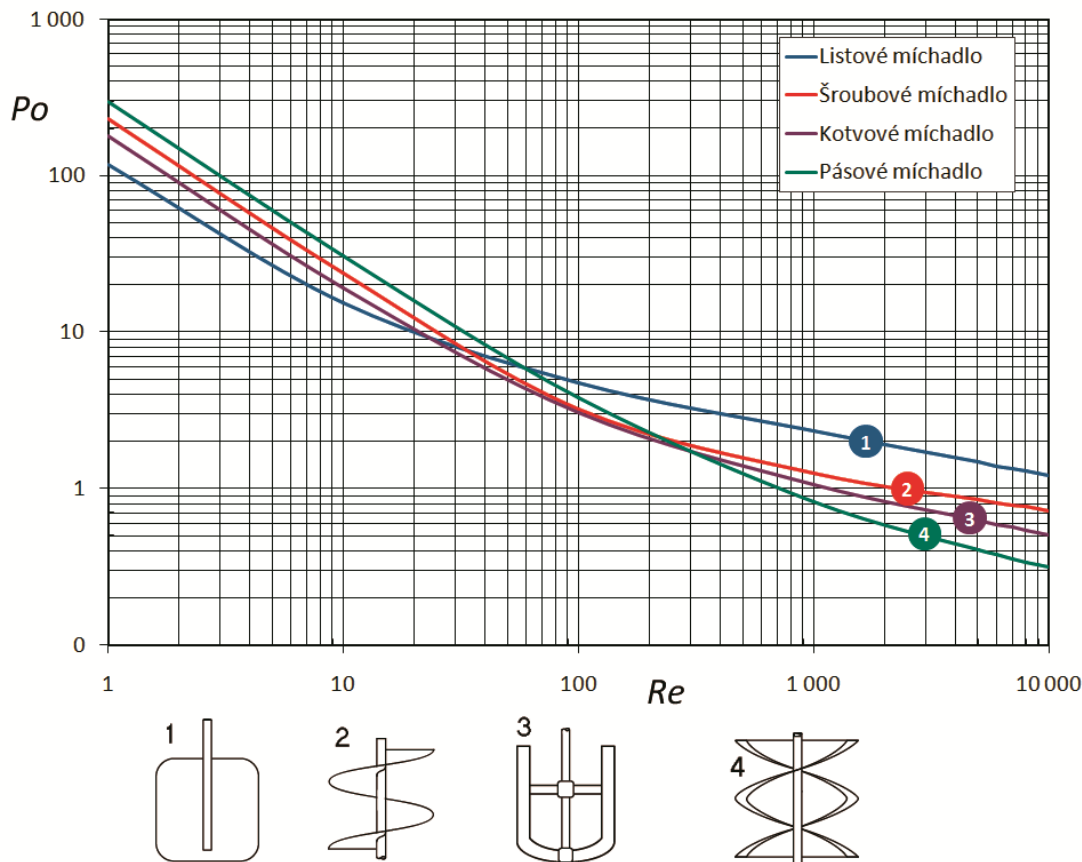
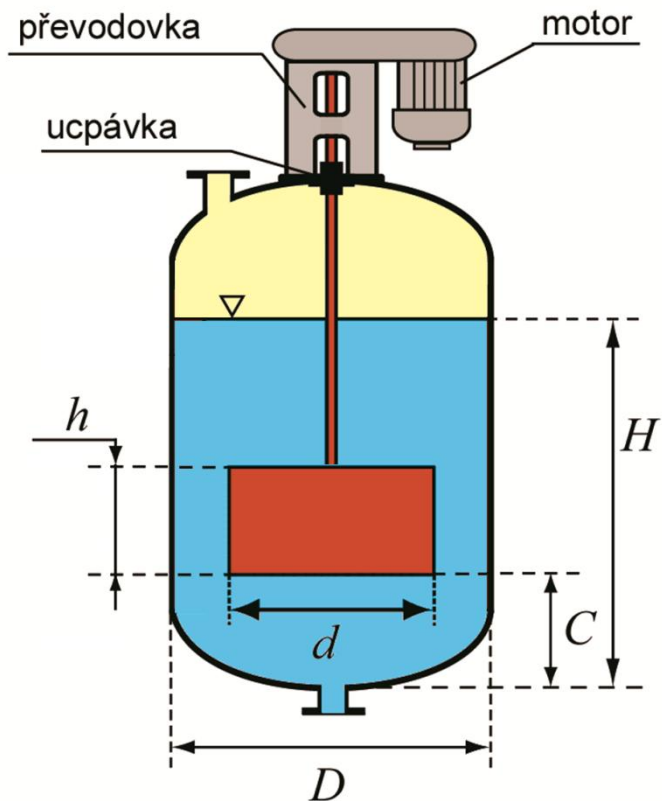


Lopátkové  
míchadlo  
(šikmé 45°lopatky)



Lightnin  
A310

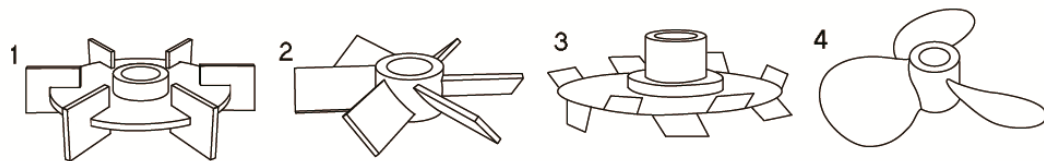
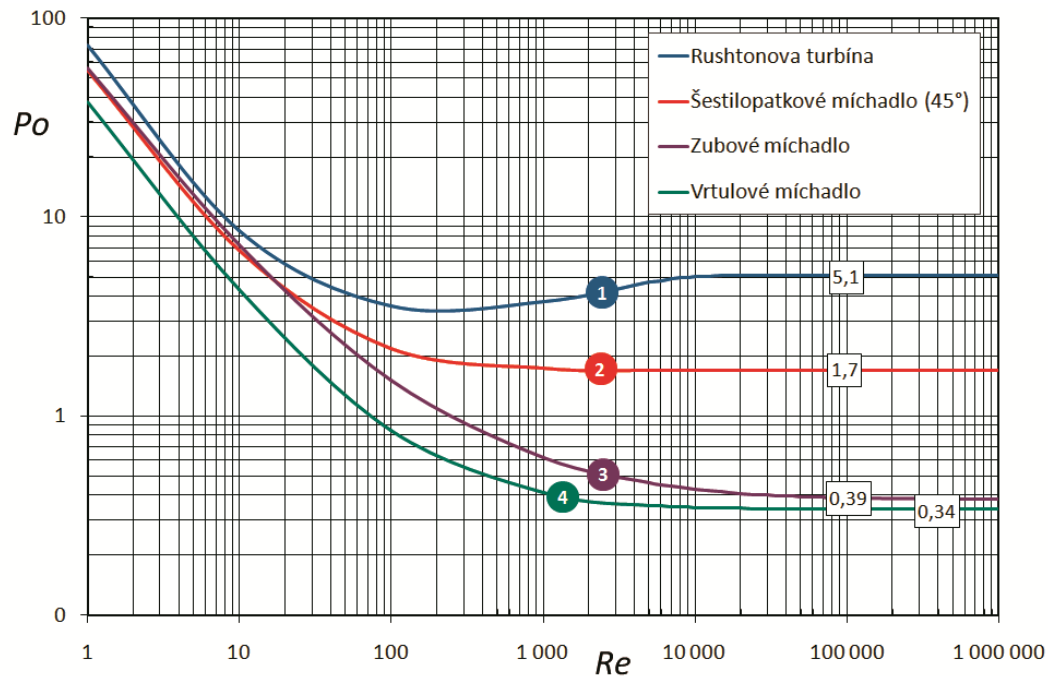
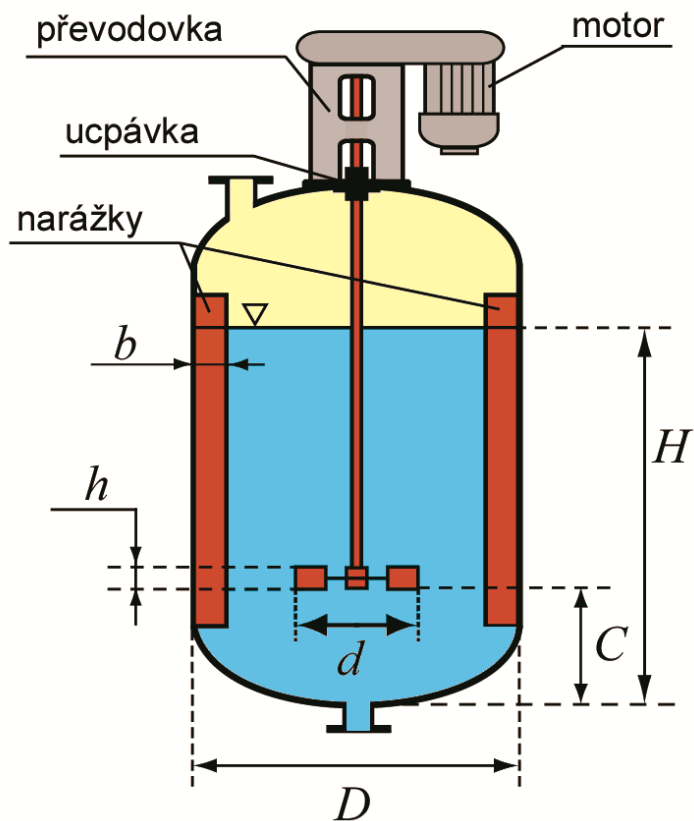
5. Míchání kapalin rotačními míchadly. Typy míchadel, míchací nádoby, význam narážek v míchacích nádobách. Reynoldsovo kritérium pro míchání. Příkonová charakteristika míchadla, určení příkonu míchadla.



$$Re = \frac{v l \rho}{\eta} \rightarrow Re_M = \frac{n d^2 \rho}{\eta}$$

$$Po = \frac{P_M}{n^3 d^5 \rho}$$

5. Míchání kapalin rotačními míchadly. Typy míchadel, míchací nádoby, význam narážek v míchacích nádobách. Reynoldsovo kritérium pro míchání. Příkonová charakteristika míchadla, určení příkonu míchadla.



$$Re = \frac{v l \rho}{\eta} \rightarrow Re_M = \frac{n d^2 \rho}{\eta}$$

$$Po = \frac{P_M}{n^3 d^5 \rho}$$

6. Darcyův zákon pro tlakovou ztrátu při proudění tekutiny vrstvou zrnitého materiálu. Pojmy: mezerovitost, hustota porvhu, mezerová a mimovrstvová rychlost. Princip koláčové filtrace, filtrační přepážky, některé typy filtrů. Hmotnostní bilance filtrace. Kinetické rovnice filtrace, filtrační konstanty. Promývání filtračního koláče.

**Henry Darcy** (1803 – 1858)

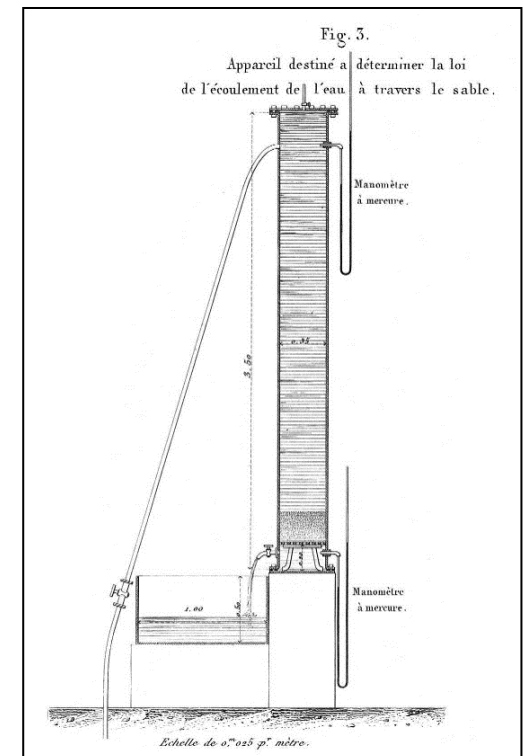
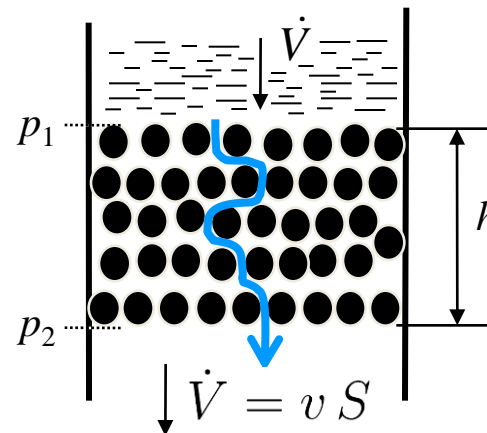
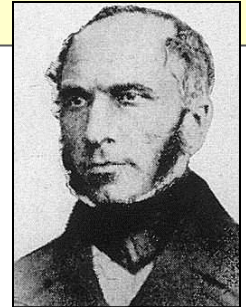
- řešil problém filtrace vody pro fontány v Dijonu (1856)
- prováděl experimenty, při kterých měřil objemový průtok vody válcem naplněným pískem a tlak
- experimentální výsledky vyjádřil rovnicí:

$$v = -\frac{\kappa (p_2 - p_1)}{\eta h}$$

obecně:

$$v = -\frac{\kappa dp}{\eta dx}$$

- tekutina proudí proti směru gradientu tlaku, tj. z místa s vyšším tlakem do místa s tlakem nižším
- rychlost proudění tekutiny je nepřímo úměrná viskozitě a výšce vrstvy



6. Darcyův zákon pro tlakovou ztrátu při proudění tekutiny vrstvou zrnitého materiálu. Pojmy: mezerovitost, hustota povrchu, mezerová a mimovrstvová rychlost. Princip koláčové filtrace, filtrační přepážky, některé typy filtrů. Hmotnostní bilance filtrace. Rychlost filtrace a kinetická rovnice filtrace. Promývání filtračního koláče.

## Filtrace

$$q_F^2 + q_M q_F - K_F \tau_F = 0 \quad \text{konst. rychlost}$$

$$q_F^2 + 2 q_F q_M - 2 K_F \tau_F = 0 \quad \text{konst. rozdíl tlaků}$$

## Promývání

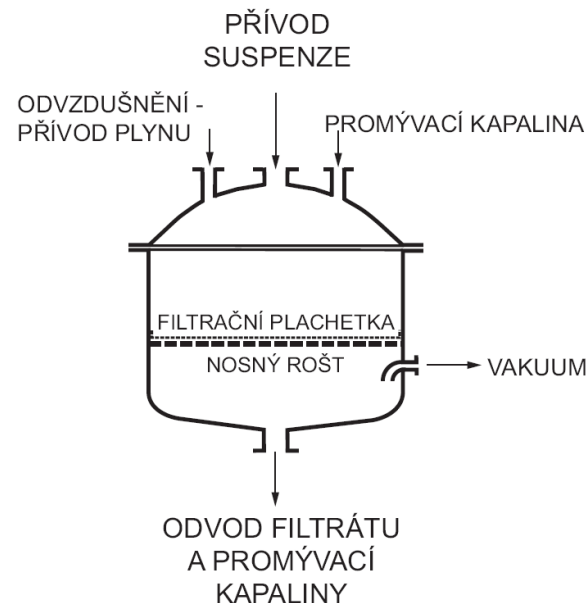
$$q_P (q_F + q_M) - K_P \tau_P = 0 \quad \text{nuč}$$

$$4q_P (q_F + q_M) = K_P \tau_P \quad \text{kalolis}$$

## Konstanty

$$K_F = \frac{\Delta p_F}{\beta \eta_F}$$

$$q_M = \frac{\gamma}{\beta} = \frac{R_M}{\beta \eta_F}$$





# 7. Bilancování entalpie v systémech bez chemické reakce. Referenční stav, výpočet entalpií složek a vícesložkových směsí.

## Bilance energie

$$\dot{H}_1 + \dot{E}_{\text{kin},1} + \dot{E}_{\text{pot},1} + \dot{Q} + P = \dot{H}_2 + \dot{E}_{\text{kin},2} + \dot{E}_{\text{pot},2} + dE_S/d\tau$$

$$\dot{Q} + \sum_{j=1}^J \dot{H}_j = \sum_{k=1}^K \dot{H}_k$$

VSTUP                      VYSTUP

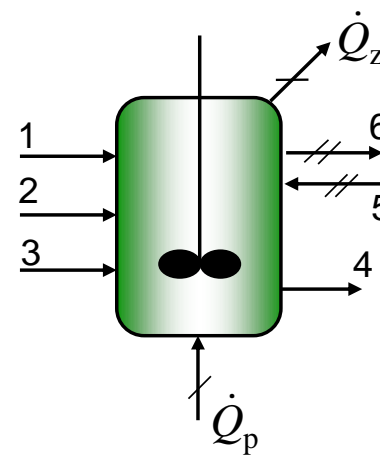
$$\dot{H} = h\dot{n} = h\dot{m}$$

$$\dot{Q} + \sum_{j=1}^J \dot{m}_j h_j = \sum_{k=1}^K \dot{m}_k h_k$$

VSTUP                      VYSTUP

$$\dot{Q} + \sum_{j=1}^J \dot{n}_j h_j = \sum_{k=1}^K \dot{n}_k h_k$$

VSTUP                      VYSTUP



$$\dot{E}_{\text{pot}} \approx \dot{E}_{\text{kin}} \approx 0$$

$$P = 0$$

## 7. Bilancování entalpie v systémech bez chemické reakce. Referenční stav, výpočet entalpií složek a vícesložkových směsí.

### Referenční stav

- teplota 273,15 K (0°C), tlak 101 325 Pa
- teplota 298,15 K (25°C), tlak 101 325 Pa

} **VŽDY** stejný pro celý bilancovaný systém !

Výpočet entalpie složky  $i$   
ze stavu 1 do stavu 2

molární tepelná kapacita [J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

$$h_i = h_{i2} - h_{i1} = \int_{T_1}^{T_2} c_{pi} dT \equiv \langle c_{pi} \rangle (T_2 - T_1)$$

skupenství složky se nemění

molární entalpie [J mol<sup>-1</sup>]

střední hodnota molární  
tepelné kapacity [J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
pro teplotu  $T = (T_1 + T_2)/2$

Pro výpočet měrné entalpie složky  $h$  [J kg<sup>-1</sup>] užíváme měrnou tepelnou kapacitu  $c_p$  [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>].

## 7. Bilancování entalpie v systémech bez chemické reakce. Referenční stav, výpočet entalpií složek a vícesložkových směsí.

kapalina  $\rightarrow$  plyn  $\left\{ \begin{array}{l} \text{při teplotě referenčního stavu je složka ve formě kapaliny (1)} \\ \text{při teplotě proudu je složka ve formě plynu (páry) (3)} \end{array} \right.$

$$h_i = h_{i3} - h_{i1} = \int_{T_1}^{T_2} c_{pl,i} dT + \Delta h_{vyp,i}(T_2) + \int_{T_2}^{T_3} c_{pg,i} dT$$

složky:  $i = 1, 2, \dots, N$

molární tepelná kapacita plynu [ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

molární výparná entalpie [ $\text{J mol}^{-1}$ ]

molární tepelná kapacita kapaliny [ $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]

Měrná entalpie proudu  $j$

$$h_j = \sum_{i=1}^N w_{ij} (h_{ij2} - h_{ij1}) + \Delta h_{j,\text{mix}} = \sum_{i=1}^N w_{ij} h_i + \Delta h_{j,\text{mix}}$$

$\Delta h_{\text{mix}} \approx 0$  směsi plynů, par a některé kapaliny

měrná směšovací entalpie směsi [ $\text{J kg}^{-1}$ ]

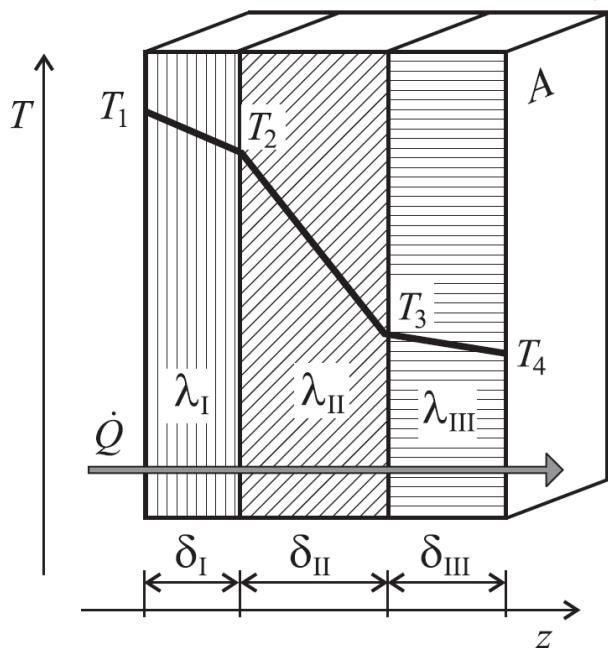
měrná entalpie čisté složky  $i$  [ $\text{J kg}^{-1}$ ]

hmotnostní zlomek



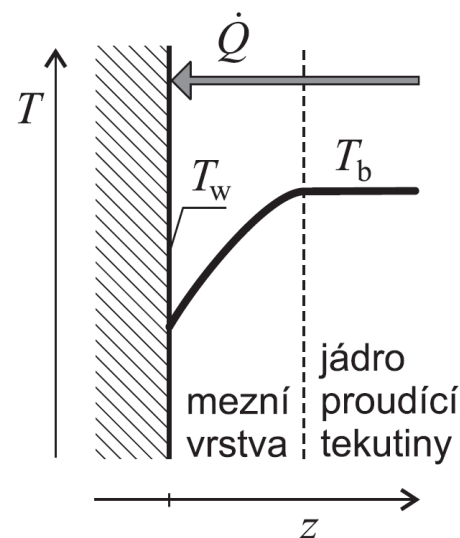
8. Sdílení tepla vedením vícevrstvou rovinnou stěnou, prostup tepla rovinnou stěnou (uplatnění Fourierova zákona a Newtonova ochlazovacího zákona v případě rovinné stěny).

Fourierův zákon:  $\dot{Q} = A\lambda \left( -\frac{dT}{dz} \right)$



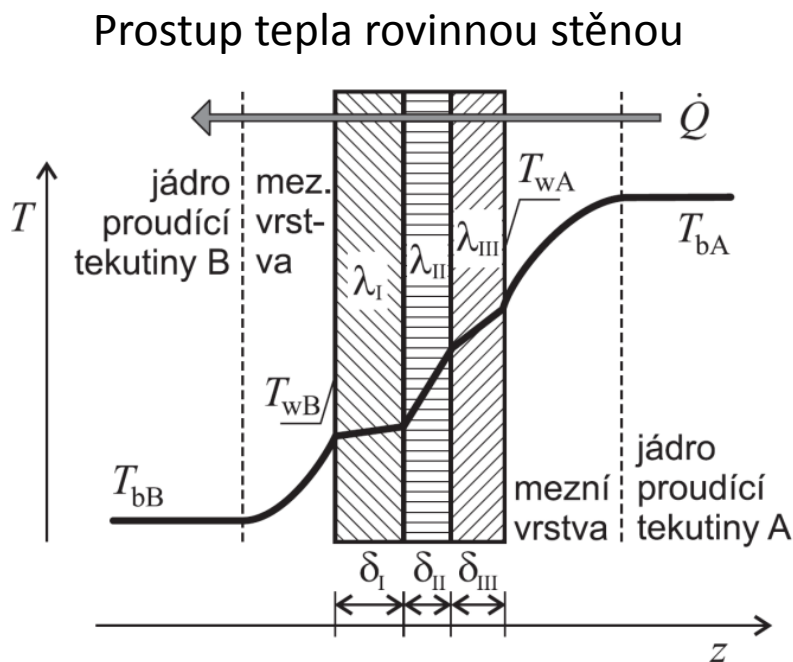
Newtonův ochlazovací zákon

$$\dot{Q} = \alpha A(T_b - T_w)$$



$$\dot{Q} = A \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j}}$$

8. Sdílení tepla vedením vícevrstvou rovinnou stěnou, prostup tepla rovinnou stěnou (uplatnění Fourierova zákona a Newtonova ochlazovacího zákona v případě rovinné stěny).



$$\dot{Q} = KA(T_{bA} - T_{bB})$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B}$$

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

$$Nu = Nu(Re, Pr, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Příklady empirických rovnic

$$Nu = 3,66 + \frac{0,19Gz^{0,8}}{1 + 0,117Gz^{0,467}}$$

$$Nu = 0,116 \left( Re^{2/3} - 125 \right) Pr^{1/3} \left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^{2/3} \right]$$

$$Nu = Nu(Re, Pr) = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

Pécletovo

$$Pe = RePr = vl/a$$

Grashofovo

$$Gr = gl^3 \beta \Delta t / \nu^2$$

Nusseltovo

$$Nu = \alpha l / \lambda$$

Prandtlovo

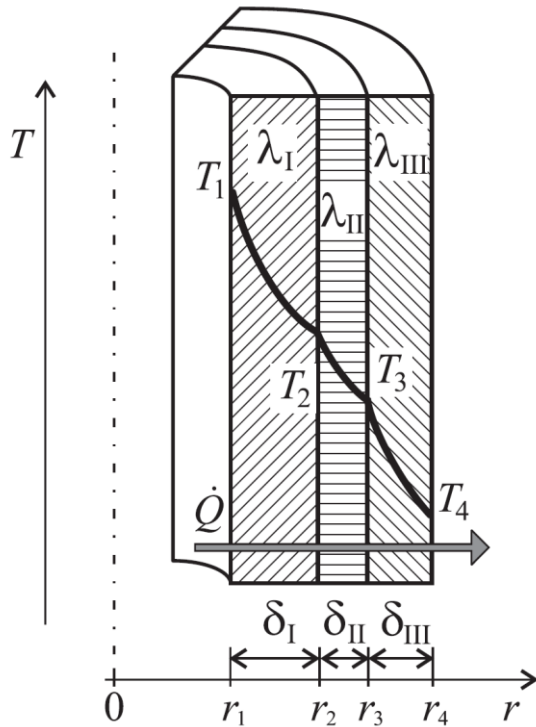
$$Pr = \nu / a = c_p \eta / \lambda$$

Reynoldsovo

$$Re = vl/\nu$$

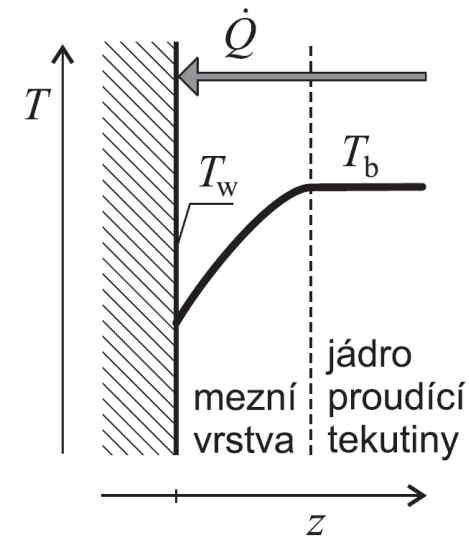
9. Sdílení tepla vedením vícevrstvou válcovou stěnou, prostup tepla válcovou stěnou (uplatnění Fourierova zákona a Newtonova ochlazovacího zákona v případě válcové stěny).

Fourierův zákon: 
$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dr} = -2\lambda\pi r L \frac{dT}{dr}$$



Newtonův ochlazovací zákon

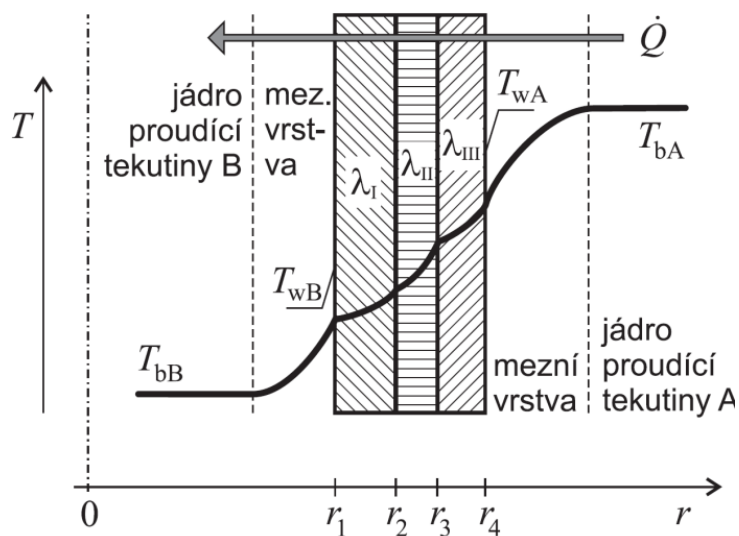
$$\dot{Q} = \alpha A (T_b - T_w)$$



$$\dot{Q} = 2\pi L \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j}} = 2\pi L \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}$$

9. Sdílení tepla vedením vícevrstvou válcovou stěnou, prostup tepla válcovou stěnou (uplatnění Fourierova zákona a Newtonova ochlazovacího zákona v případě válcové stěny).

Prostup tepla válcovou stěnou



$$\dot{Q} = K_L L \Delta T$$

$$\frac{\pi}{K_L} = \frac{1}{\alpha_A d_A} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} + \frac{1}{\alpha_B d_B}$$

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{\ell}$$

$$\text{Nu} = \text{Nu}(\text{Re}, \text{Pr}, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Příklady empirických rovnic

$$\text{Nu} = 3,66 + \frac{0,19 \text{Gz}^{0,8}}{1 + 0,117 \text{Gz}^{0,467}}$$

$$\text{Nu} = 0,116 \left( \text{Re}^{2/3} - 125 \right) \text{Pr}^{1/3} \left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^{2/3} \right]$$

$$\text{Nu} = \text{Nu}(\text{Re}, \text{Pr}) = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}$$

Pécletovo

$$\text{Pe} = \text{RePr} = \nu l / a$$

Grashofovo

$$\text{Gr} = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2$$

Nusseltovo

$$\text{Nu} = \alpha l / \lambda$$

Prandtlovo

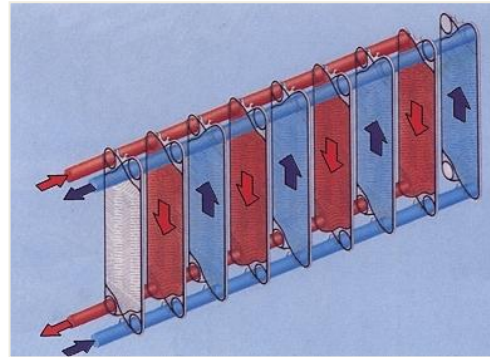
$$\text{Pr} = \nu / a = c_p \eta / \lambda$$

Reynoldsovo

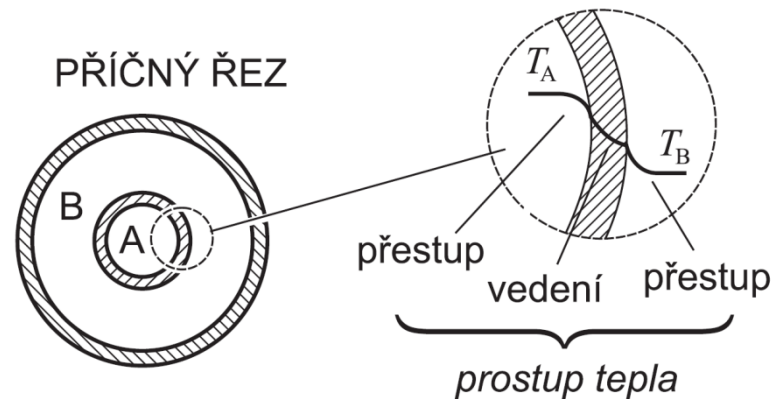
$$\text{Re} = \nu l / \nu$$

10. Tepelné výměníky: typy výměníků tepla, rozložení teplot podél výměníků při různém uspořádání toků, teplotní profil v blízkosti teplosměnné plochy. Výpočet velikosti teplosměnné plochy výměníku, entalpická bilance výměníku tepla.

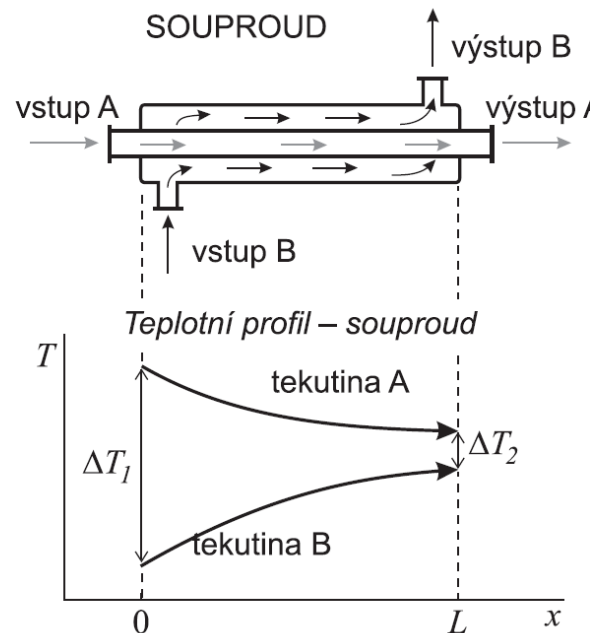
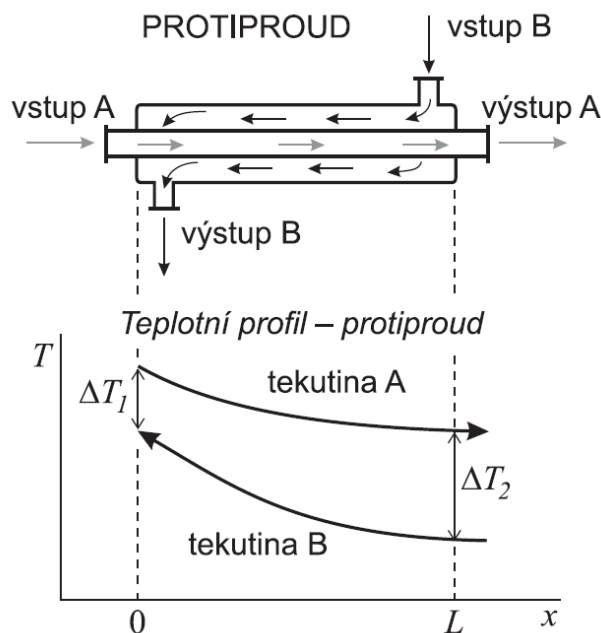
### Deskové výměníky tepla



### Trubkové výměníky tepla



10. Tepelné výměníky: typy výměníků tepla, rozložení teplot podél výměníků při různém uspořádání toků, teplotní profil v blízkosti teplosměnné plochy. Výpočet velikosti teplosměnné plochy výměníku, entalpická bilance výměníku tepla.



$$\dot{Q}_{AB} = K_L L \Delta T_{ls}$$

$$\dot{Q}_{AB} = K A \Delta T_{ls}$$

$$\Delta T_{ls} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

10. Tepelné výměníky: typy výměníků tepla, rozložení teplot podél výměníků při různém uspořádání toků, teplotní profil v blízkosti teplosměnné plochy. Výpočet velikosti teplosměnné plochy výměníku, entalpická bilance výměníku tepla.

$$\overbrace{\dot{H}_{A,i} + \dot{H}_{B,i}}^{\text{přítok}} = \overbrace{\dot{H}_{A,e} + \dot{H}_{B,e}}^{\text{odtok}}$$

$$\dot{m}_A(h_{A,i} - h_{A,e}) = \dot{m}_B(h_{B,e} - h_{B,i}) = \dot{Q}_{AB}$$

skupenství složky se nemění

$$h_i - h_e = \int_{T_e}^{T_i} c_p dT = \overbrace{c_p(T_i - T_e)}^{\text{pro konstantní } c_p}$$

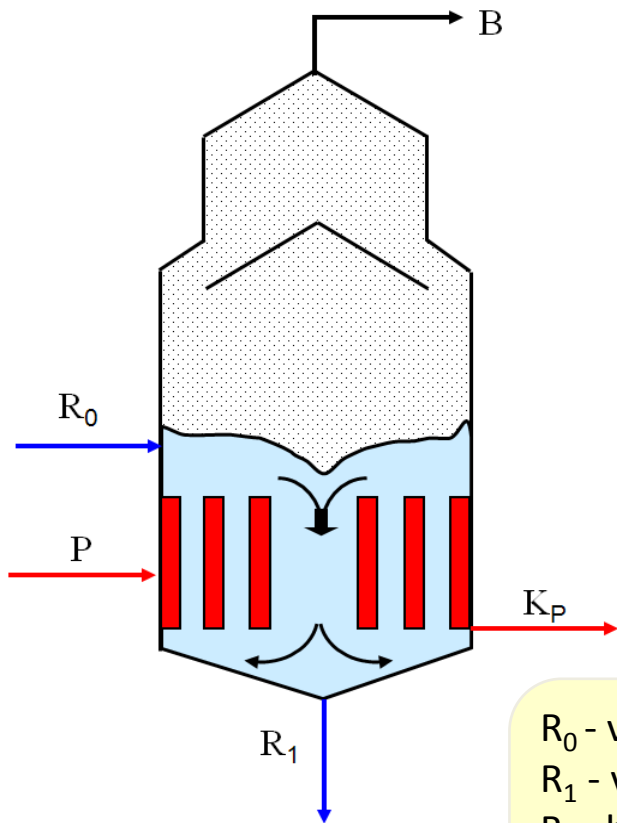
sl. A kondenzuje ( $t_p = t_k$ )

$$h_{A,i} - h_{A,e} = \Delta h_{A\text{výp}}$$



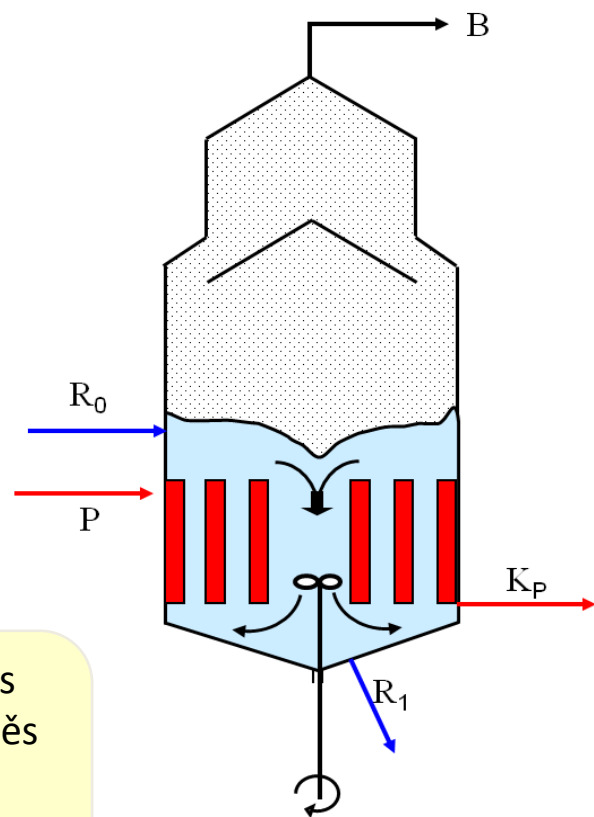
11. Odparky, základní typy odparek. Hmotnostní a entalpická bilance jednočlenné odparky, účinný teplotní rozdíl a teplotní ztráty. Rozložení teplot v odparce. Snižování spotřeby topné páry.

Robertova odparka



$R_0$  - vstupující kapalná směs  
 $R_1$  - vystupující kapalná směs  
B - brýdová pára  
P - topná pára  
 $K_p$  - kondenzát topné páry

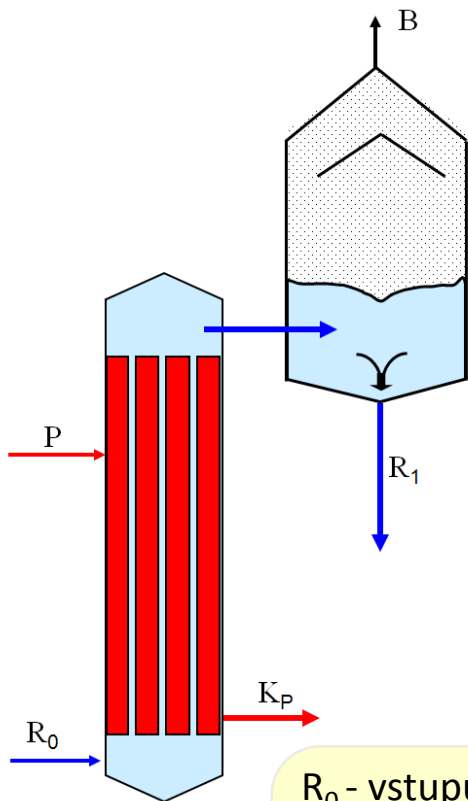
Odparka s nucenou cirkulací  
vestavěným axiálním čerpadlem





11. Odparky, základní typy odparek. Hmotnostní a entalpická bilance jednočlenné odparky, účinný teplotní rozdíl a teplotní ztráty. Rozložení teplot v odparce. Snižování spotřeby topné páry.

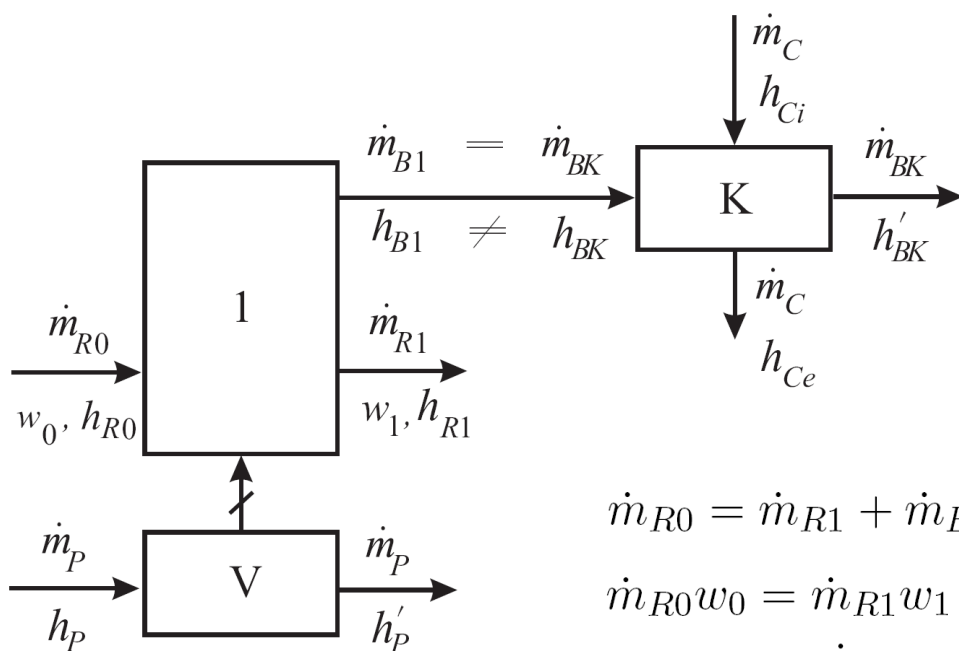
Kestnerova odparka se šplhacím filmem



$R_0$  - vstupující kapalná směs  
 $R_1$  - vystupující kapalná směs  
B - brýdová pára  
P - topná pára  
 $K_p$  - kondenzát topné páry



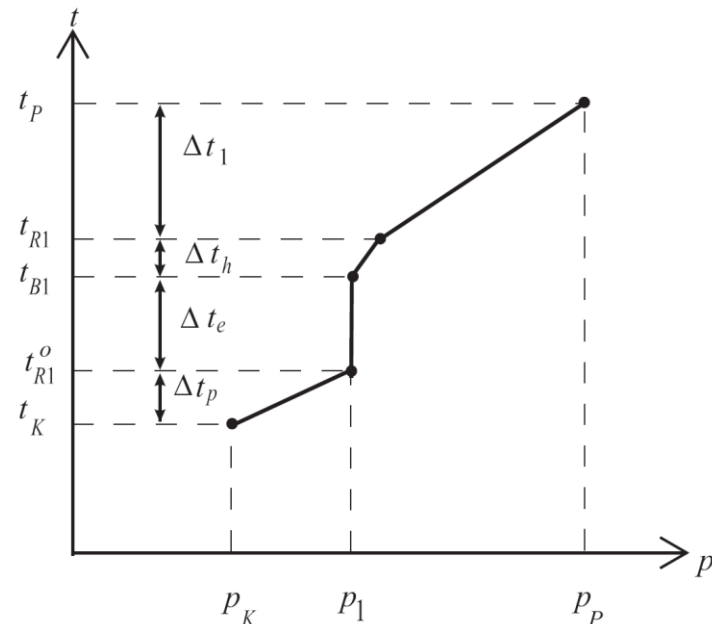
11. Odparky, základní typy odparek. Hmotnostní a entalpická bilance jednočlenné odparky, účinný teplotní rozdíl a teplotní ztráty. Rozložení teplot v odparce. Snižování spotřeby topné páry.



$$\dot{m}_{R0} = \dot{m}_{R1} + \dot{m}_{B1}$$

$$\dot{m}_{R0}w_0 = \dot{m}_{R1}w_1$$

$$\dot{m}_{R0}h_{R0} + \dot{Q}_V = \dot{m}_{R1}h_{R1} + \dot{m}_{B1}h_{B1}$$

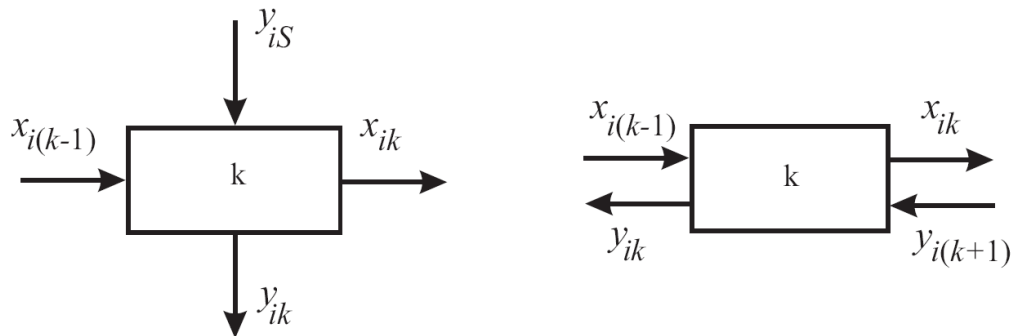
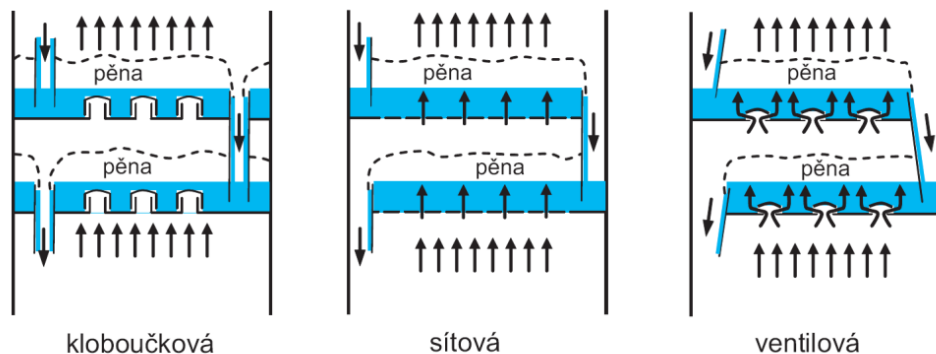
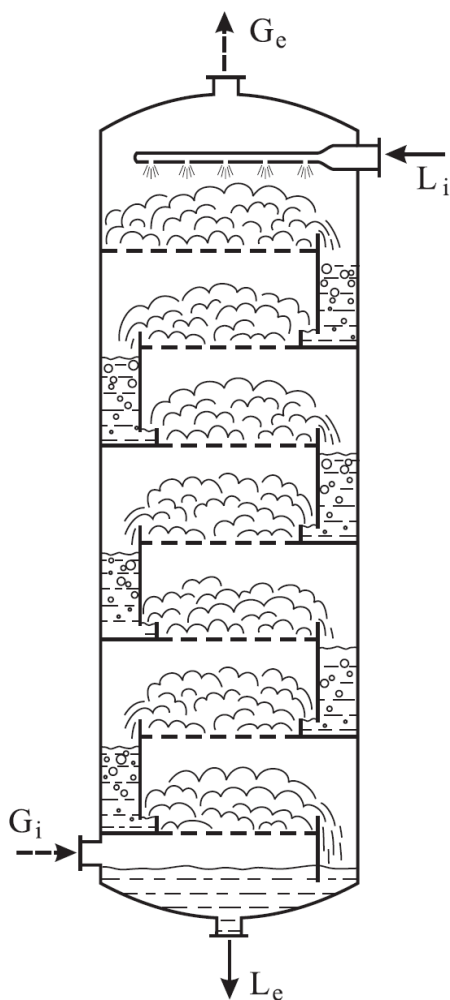


$$h_R = t_R (w c_{ps} + (1 - w) c_{pr}) + w \Delta h_{\text{rozp}}$$

$$t_{R1} = t_{R1}^o + \Delta t_e + \Delta t_h$$

$$\dot{Q}_V = \dot{m}_P (h_P - h'_P) = \dot{m}_P \Delta h_{\text{výp}, P}$$

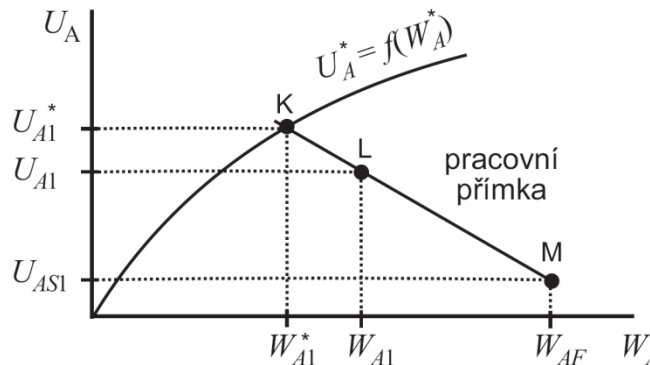
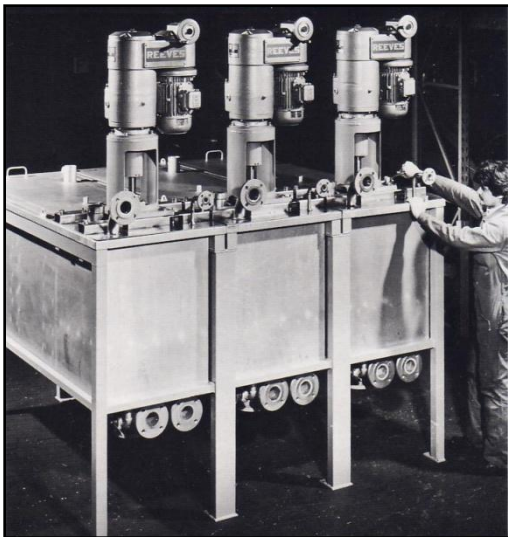
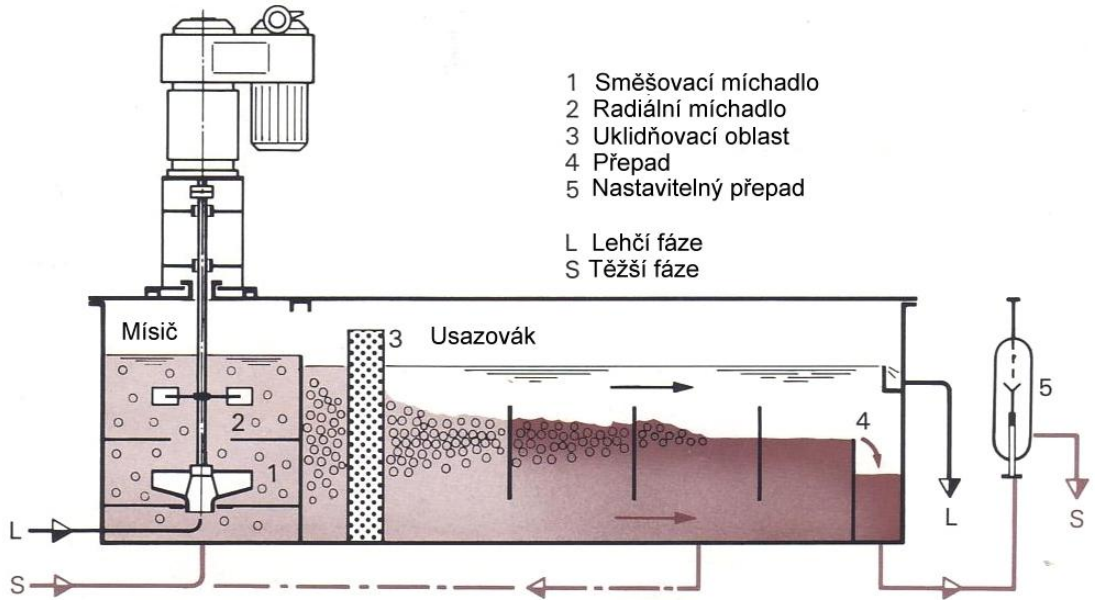
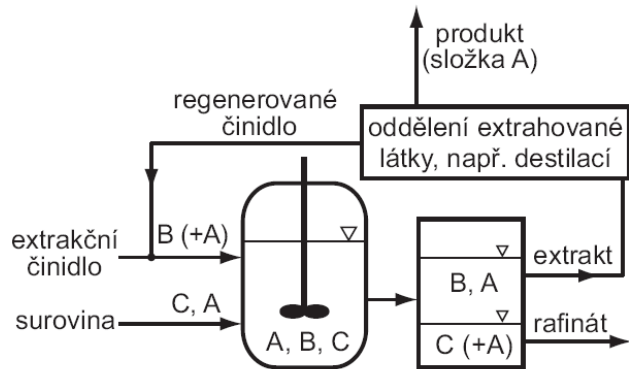
12. Stupňový kontakt fází: konstrukce patrových kolon, rovnovážný stupeň, účinnost stupně, celková účinnost. Na zvoleném příkladu (destilace, rektifikace, nebo kapalinová extrakce) napište materiálovou bilanci stupně a příslušnou rovnováhu mezi fázemi.



Účinnost stupně

$$E_k = \frac{y_{iS} - y_{ik}}{y_{iS} - y_{ik}^*} = \frac{x_{i(k-1)} - x_{ik}}{x_{i(k-1)} - x_{ik}^*}$$

13. Kapalinová extrakce v systémech s nemísitelnými rozpouštědly. Vyjádření fázové rovnováhy, představa rovnovážného stupně, účinnost nerovnovážného extrakčního stupně. Grafické a numerické řešení jednostupňové a opakované extrakce. Princip protiproudé extrakce. Typy extraktorů.



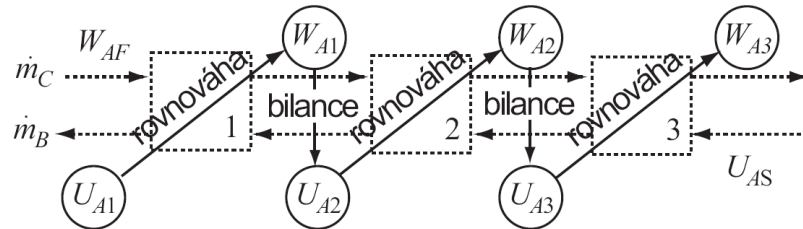
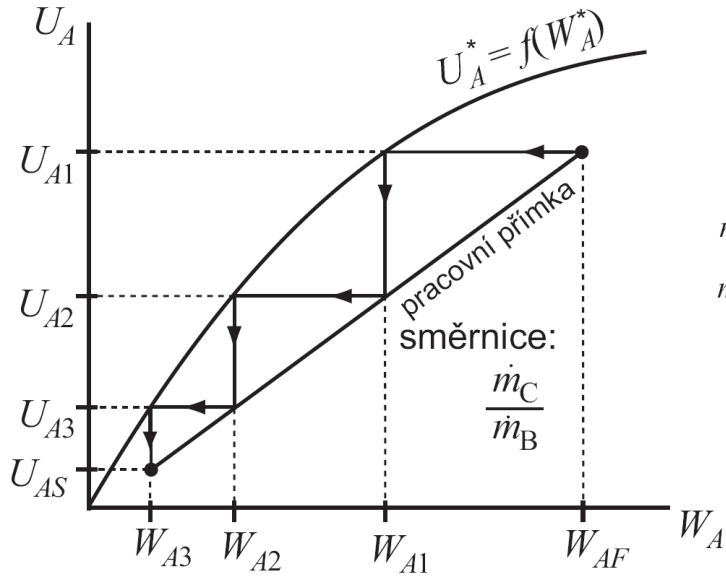
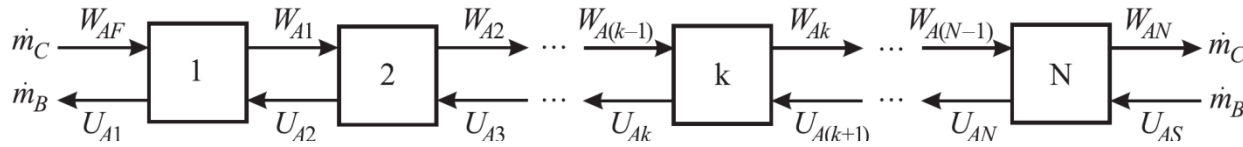
Účinnost stupně:

$$E_1 = \frac{W_{AF} - W_{A1}}{W_{AF} - W_{A1}^*} = \frac{U_{A1} - U_{AS1}}{U_{A1}^* - U_{AS1}} = \frac{\overline{LM}}{\overline{KM}}$$

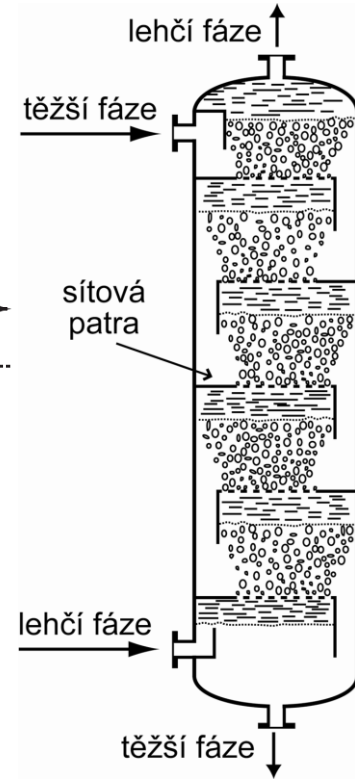
Obečná rovnice pracovní přímky:

$$U_A = - \frac{m_C}{m_{B1}} W_A + \frac{m_C}{m_{B1}} W_{AF} + U_{AS1}$$

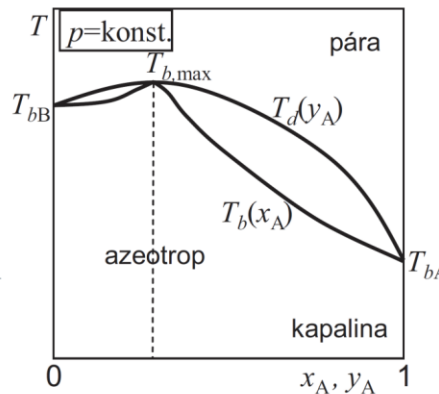
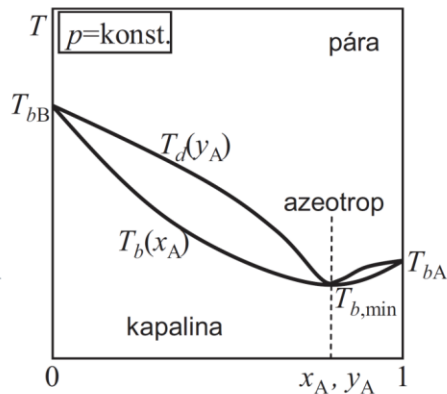
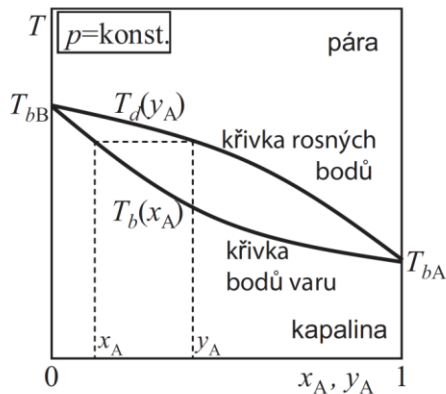
13. Kapalinová extrakce v systémech s nemísitelnými rozpouštědly. Vyjádření fázové rovnováhy, představa rovnovážného stupně, účinnost nerovnovážného extrakčního stupně. Grafické a numerické řešení jednostupňové a opakované extrakce. Princip protiproudé extrakce. Typy extraktorů.



$$\dot{m}_C W_{AF} + \dot{m}_B U_{AS} = \dot{m}_C W_{AN} + \dot{m}_B U_{A1}$$



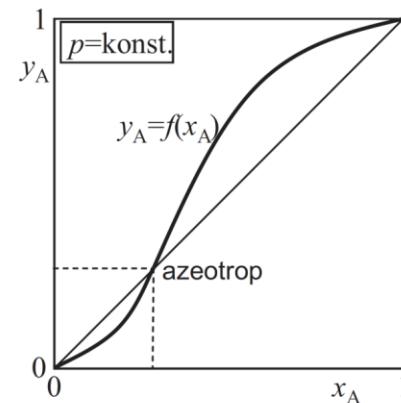
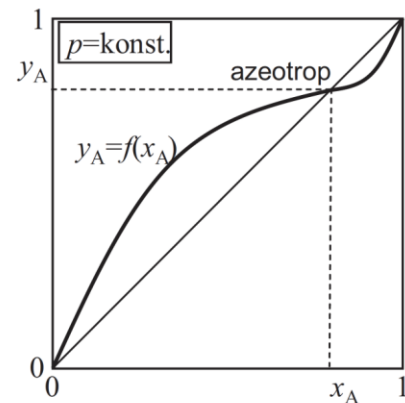
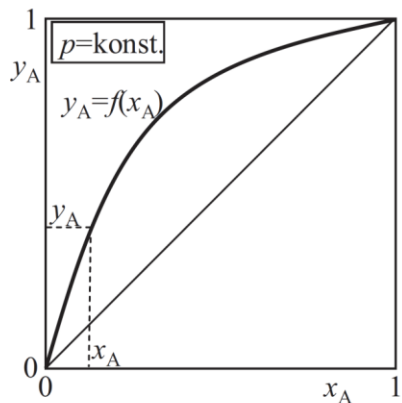
14. Destilace. Popis fázové rovnováhy kapalina-pára. Tenze par, relativní těkavost. Principy mžikové a vsádkové (diferenciální) destilace. Materiálová bilance mžikové a vsádkové destilace. Grafické řešení mžikové destilace.



Raoultův zákon

$$y_A p = p_A^\circ(T) x_A$$

$$y_B p = p_B^\circ(T) x_B$$



Relativní těkavost

$$\alpha_{AB} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} = \frac{y_A/x_A}{(1-y_A)/(1-x_A)}$$

$$y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x_A}$$

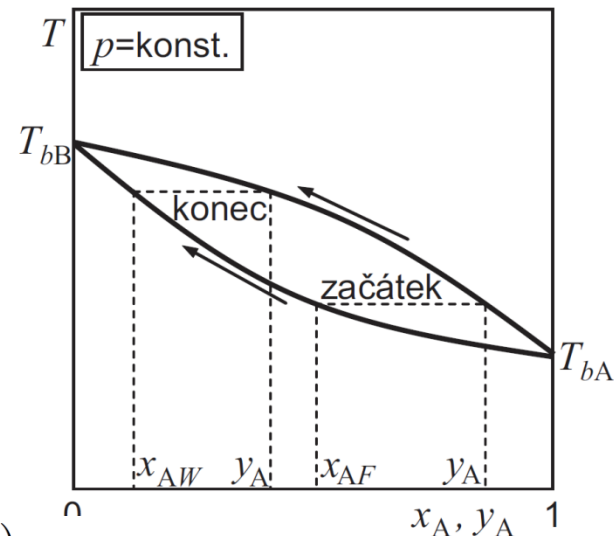
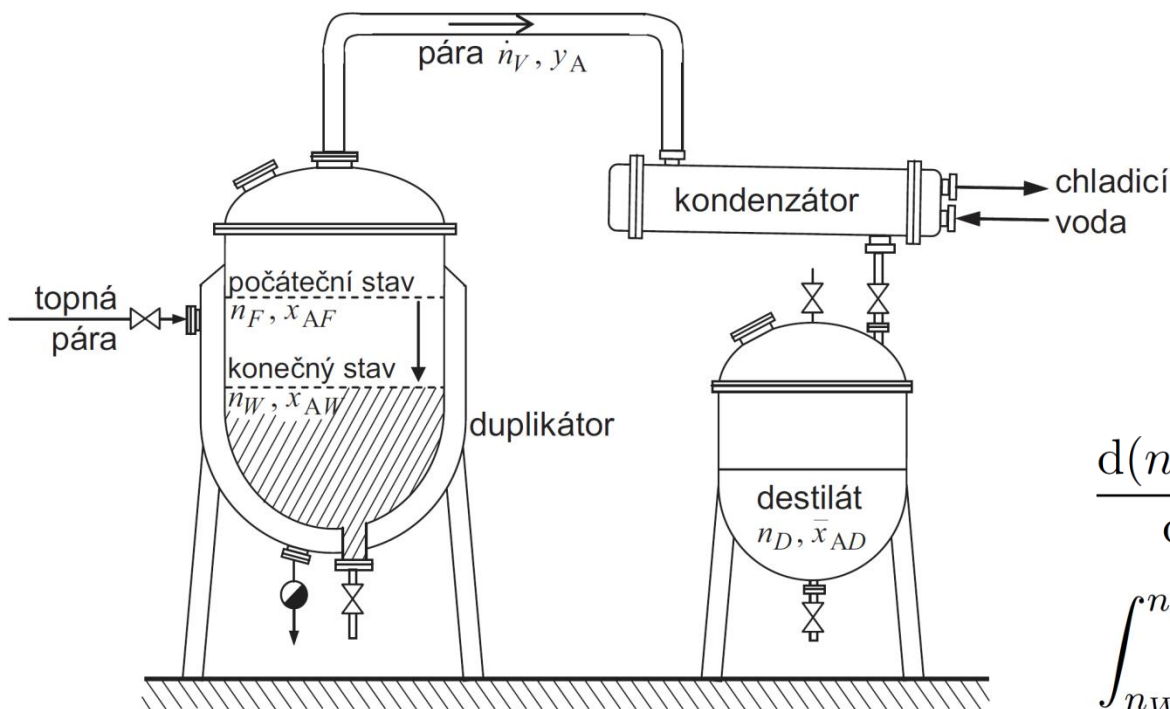
Antoineova rovnice

$$\ln p_i^\circ = A_i - B_i/(T + C_i), \quad i = A, B$$



14. Destilace. Popis fázové rovnováhy kapalina-pára. Tenze par, relativní těkavost. Principy mžikové a vsádkové (diferenciální) destilace. Materiálová bilance mžikové a vsádkové destilace. Grafické řešení mžikové destilace.

### Vsádková (diferenciální) destilace



$$\frac{d(n_L x_A)}{d\tau} = -\dot{n}_V y_A$$

$$\underbrace{\int_{n_W}^{n_F} \frac{dn_L}{n_L}}_{\ln(n_F/n_W)} = \int_{x_{AW}}^{x_{AF}} \frac{dx_A}{y_A - x_A}$$

Relativní těkavost = konst.

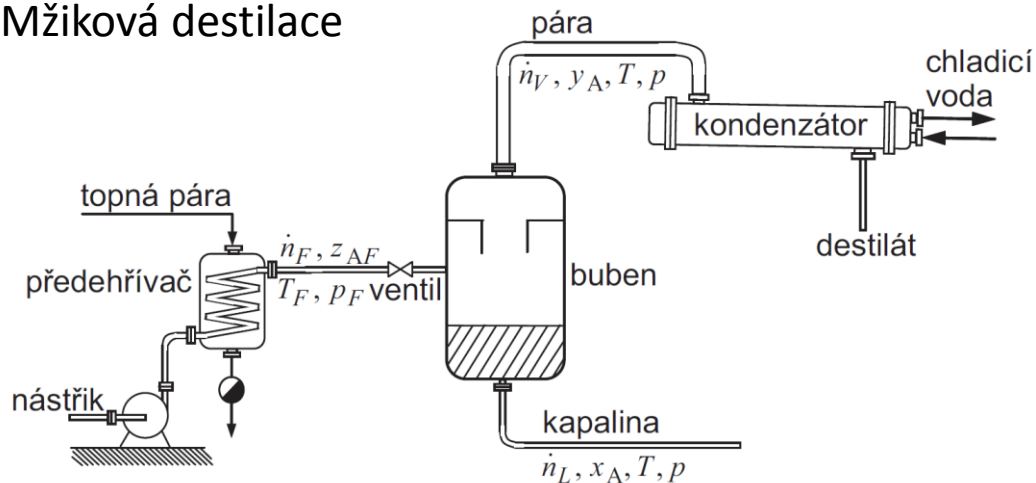
$$\ln \frac{n_F}{n_W} = \frac{1}{\alpha_{AB} - 1} \ln \frac{x_{AF}(1 - x_{AW})}{x_{AW}(1 - x_{AF})} + \ln \frac{1 - x_{AW}}{1 - x_{AF}}$$

$$y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x_A}$$



14. Destilace. Popis fázové rovnováhy kapalina-pára. Tenze par, relativní těkavost. Principy mžikové a vsádkové (diferenciální) destilace. Materiálová bilance mžikové a vsádkové destilace. Grafické řešení mžikové destilace.

Mžiková destilace

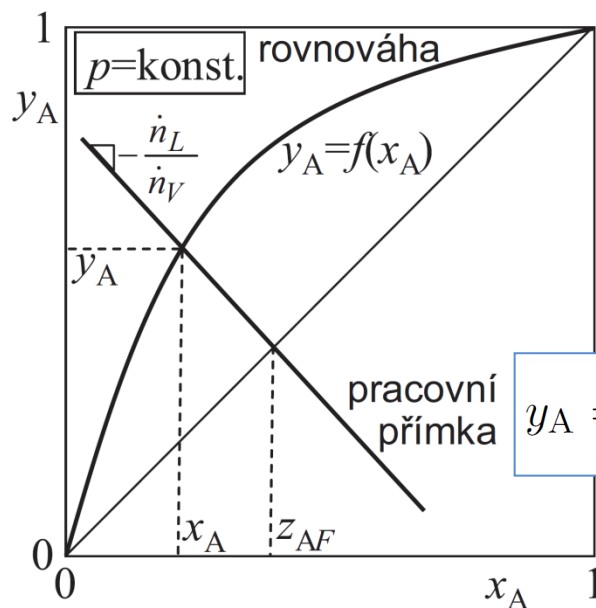
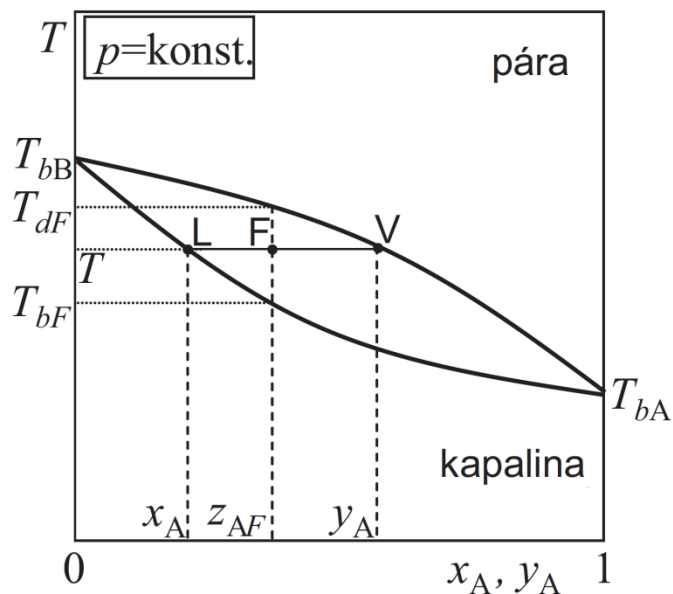


$$\dot{n}_F = \dot{n}_L + \dot{n}_V$$

$$\dot{n}_F z_{AF} = \dot{n}_L x_A + \dot{n}_V y_A$$

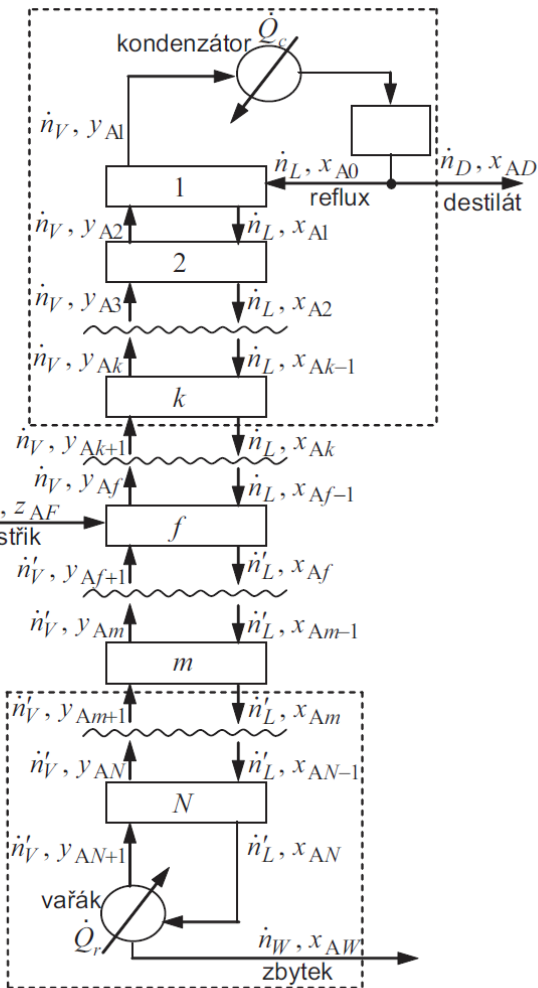
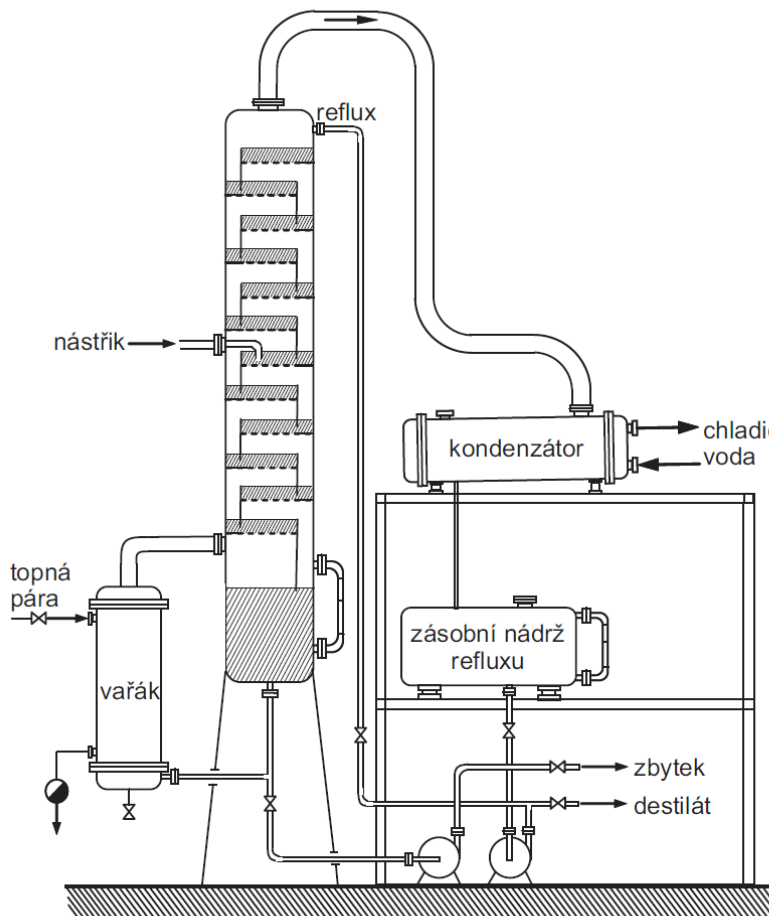
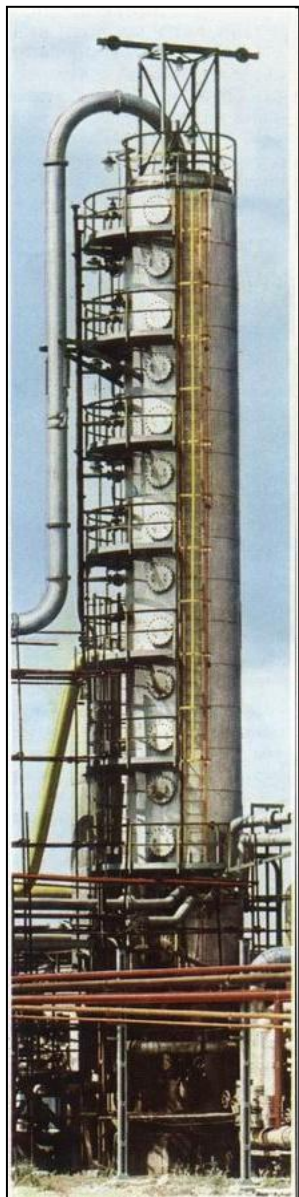
$$y_A = \frac{\alpha_{AB} x_A}{1 + (\alpha_{AB} - 1)x_A}$$

$$\dot{n}_F h_F = \dot{n}_L h_L + \dot{n}_V h_V$$



$$y_A = z_{AF} - \frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_V} (x_A - z_{AF})$$

15. Schéma a princip funkce zařízení pro kontinuální rektifikaci. Látková bilance, refluxní poměr, určení počtu rovnovážných stupňů v rozdělovacím diagramu.



$$\dot{n}_F = \dot{n}_D + \dot{n}_W$$

$$\dot{n}_F z_{AF} = \dot{n}_D x_{AD} + \dot{n}_W x_{AW}$$

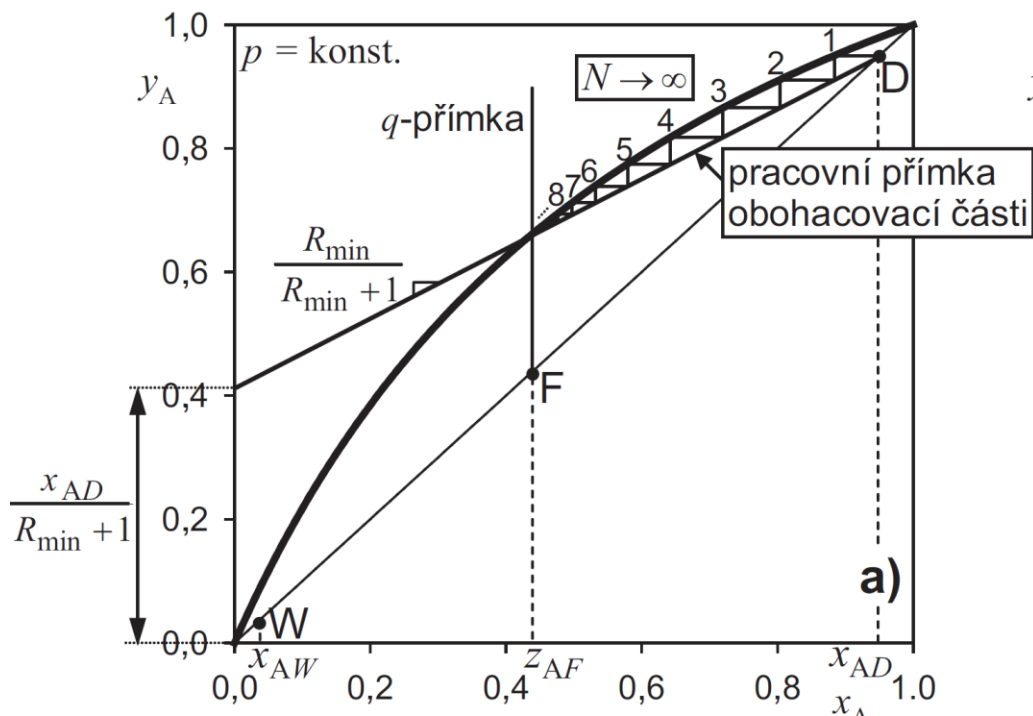
Refluxní poměr

$$R = \dot{n}_L / \dot{n}_D$$

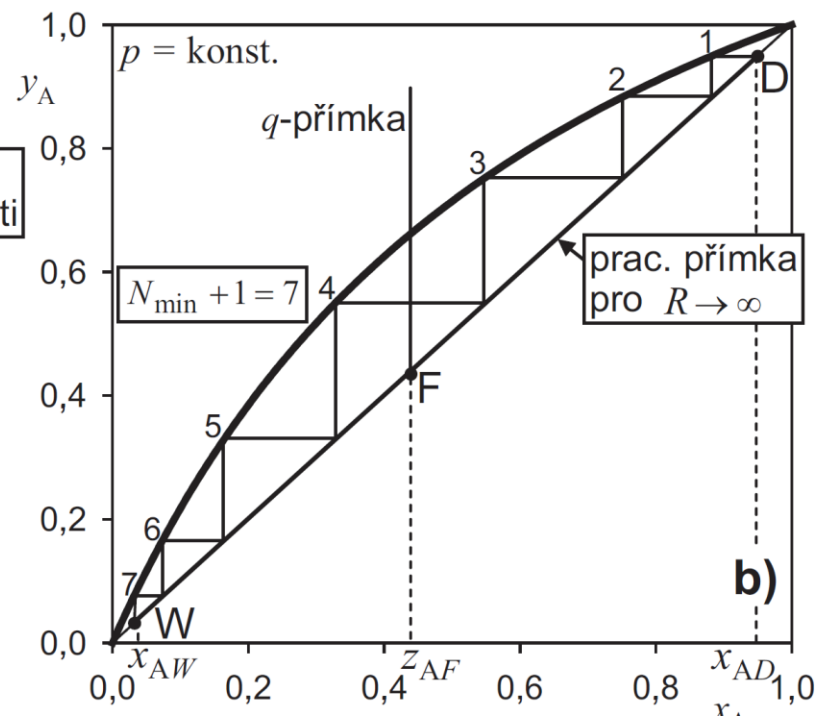


16. Kontinuální rektifikace: určení minimálního poměru zpětného toku, činnost kolony při totálním refluxu, celková entalpická bilance kolony, entalpická bilance kondenzátoru. Materiálová a entalpická bilance nástřikového patra.

Minimální poměru zpětného toku



Totální reflux



Entalpická bilance

$$\dot{n}_F h_F + \dot{Q}_r = \dot{n}_D h_D + \dot{n}_W h_W + \dot{Q}_c$$

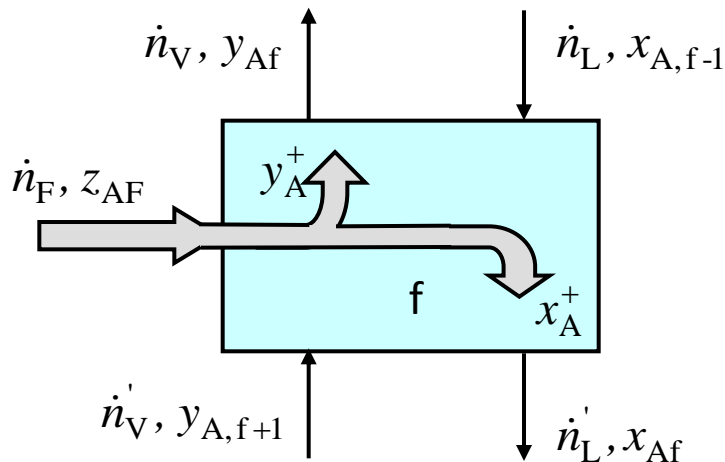
$$\dot{Q}_c = \dot{n}_V (h_{V1} - h_D) = (R + 1) \dot{n}_D (h_{V1} - h_D)$$

celková

totální kondenzátor

16. Kontinuální rektifikace: určení minimálního poměru zpětného toku, činnost kolony při totálním refluxu, celková entalpická bilance kolony, entalpická bilance kondenzátoru. Materiálová a entalpická bilance nástřikového patra.

$$\dot{n}_V = \dot{n}'_V + (1 - q) \dot{n}_F$$



$$\dot{n}'_L = \dot{n}_L + q\dot{n}_F$$

$$\dot{n}_F h_F + \dot{Q}_r = \dot{n}_D h_D + \dot{n}_W h_W + \dot{Q}_c$$

Látková bilance nástřiku

$$\dot{n}_F z_{AF} = (\dot{n}_V - \dot{n}'_V) y_A^+ + (\dot{n}'_L - \dot{n}_L) x_A^+$$

$$\dot{n}'_V = \dot{n}_V + (q - 1) \dot{n}_F$$

$$\dot{n}'_L = \dot{n}_L + q\dot{n}_F$$

$q$  - podíl kapaliny v nástřiku

Výpočet parametru  $q$

$$q = \frac{h_{VF} - h_F}{h_{VF} - h_{LF}} = \frac{h_{VF} - h_F}{h_{VF} - h_{LF}}$$

VF - entalpie rovnovážné páry

LF - entalpie rovnovážné kapaliny

F - entalpie nástřiku

pro složení nástřiku

$q = 1$  nástřik: rovnovážná kapalina

$q = 0$  nástřik: rovnovážná pára

$q > 1$  nástřik: podchlazená kapalina

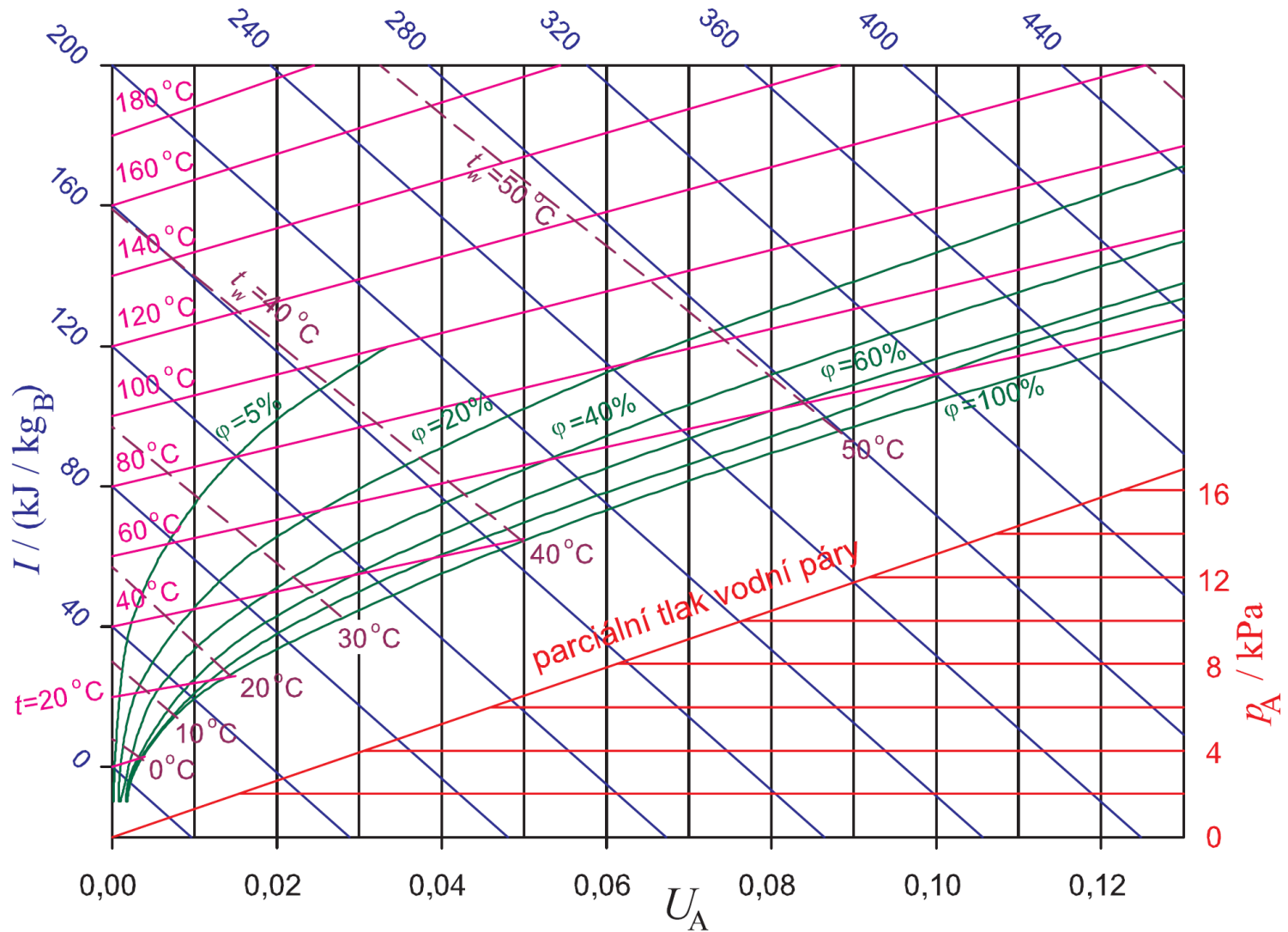
$q < 0$  nástřik: přehřátá pára

$0 < q < 1$  nástřik: směs kapaliny a páry

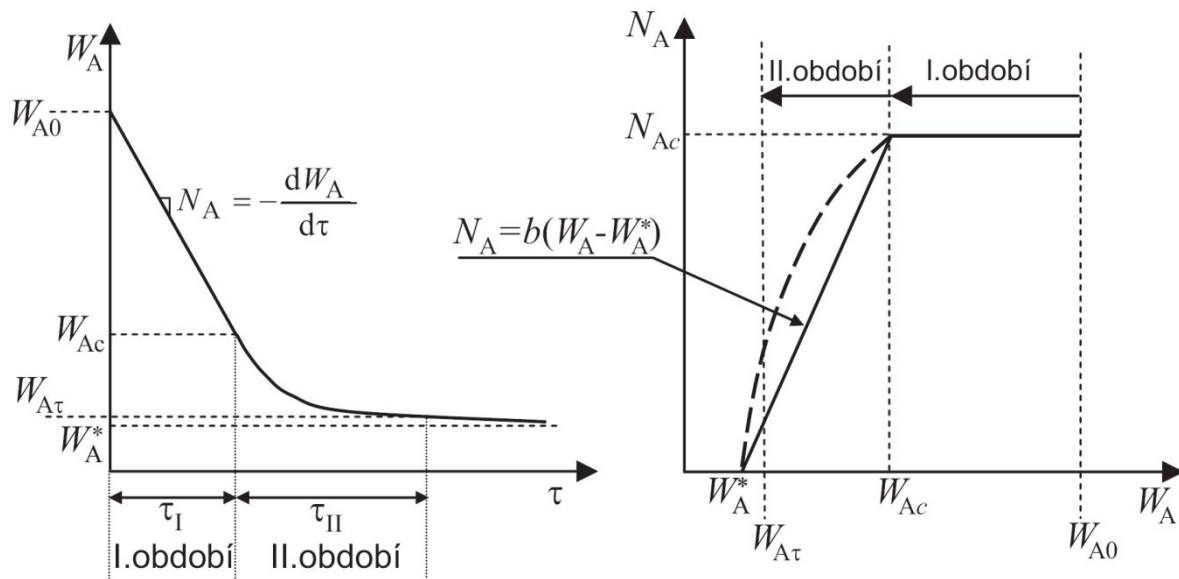
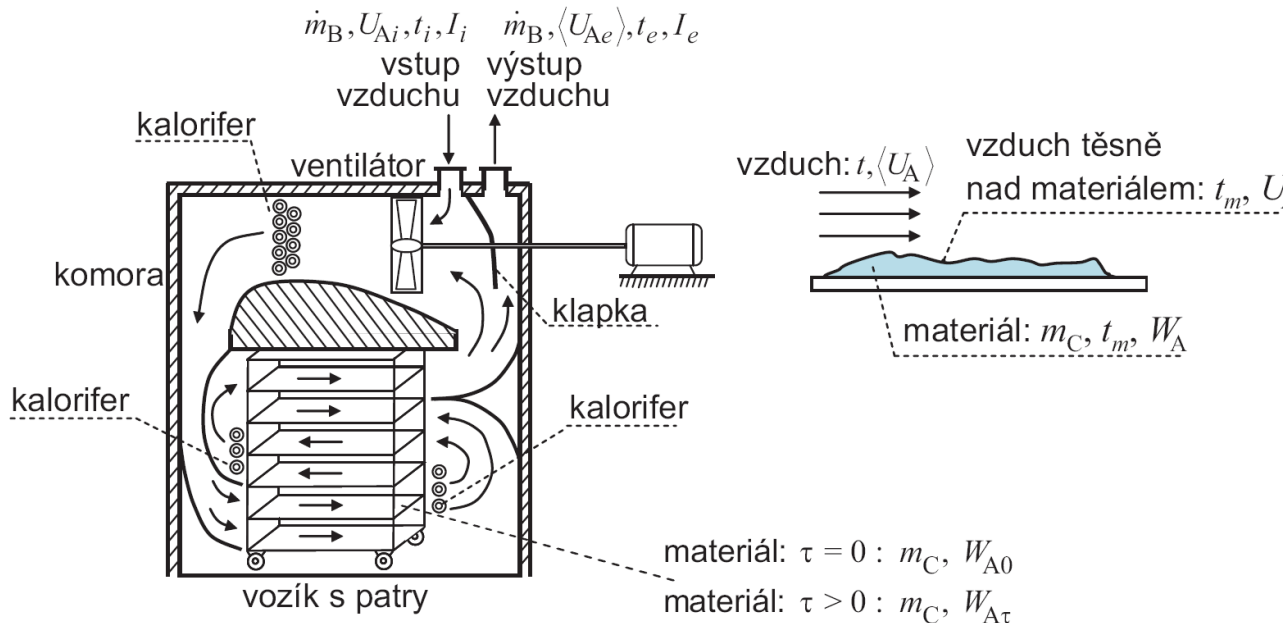
Rovnice  $q$  přímky

$$y_A^+ = \frac{q}{q-1} x_A^+ - \frac{z_{AF}}{q-1}$$

17. Sušení pevných látek: vlastnosti vlhkého vzduchu, entalpický diagram vlhkého vzduchu. Materiálová a entalpická bilance vsádkové sušárny, doba sušení.

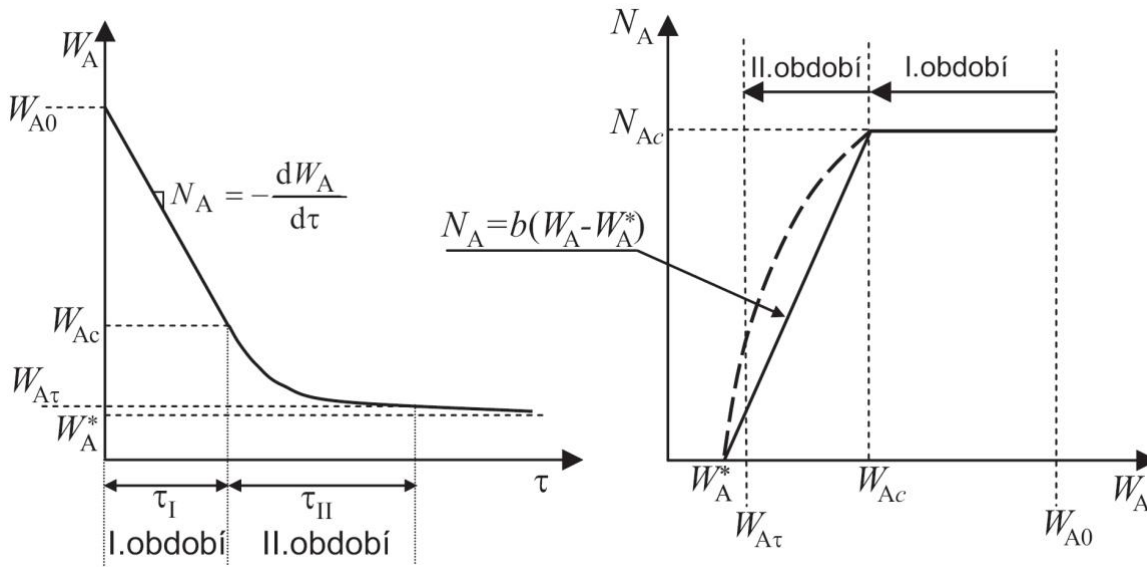


# 17. Sušení pevných látek: vlastnosti vlhkého vzduchu, entalpický diagram vlhkého vzduchu. Materiálová a entalpická bilance vsádkové sušárny, doba sušení.





17. Sušení pevných látek: vlastnosti vlhkého vzduchu, entalpický diagram vlhkého vzduchu. Materiálová a entalpická bilance vsádkové sušárny, doba sušení.



$$\frac{dm_A}{d\tau} = -\dot{m}_A$$

$$d(m_C W_A)/d\tau = -\Phi_A \mathcal{A}$$

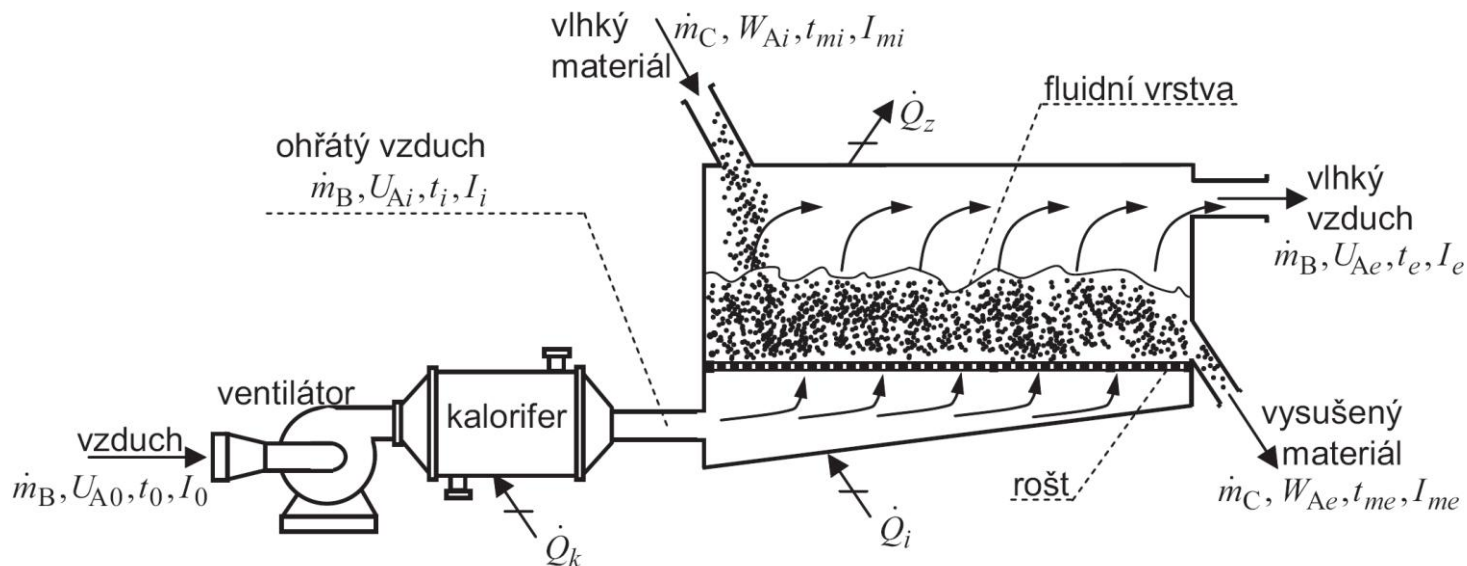
$$\int_0^{\tau_I} d\tau = -\frac{1}{N_{Ac}} \int_{W_{A0}}^{W_{A\tau}} dW_A$$

Lineární závislost ve II. období

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} = \frac{1}{N_{Ac}} \left( (W_{A0} - W_{Ac}) + (W_{Ac} - W_A^*) \ln \frac{W_{Ac} - W_A^*}{W_{A\tau} - W_A^*} \right)$$

$$W_A^* < W_{A\tau} < W_{Ac} < W_{A0}$$

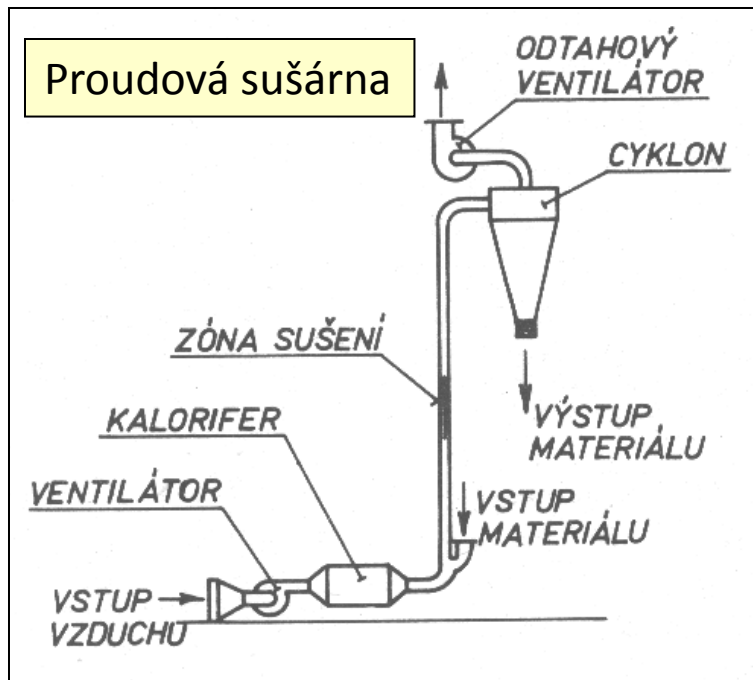
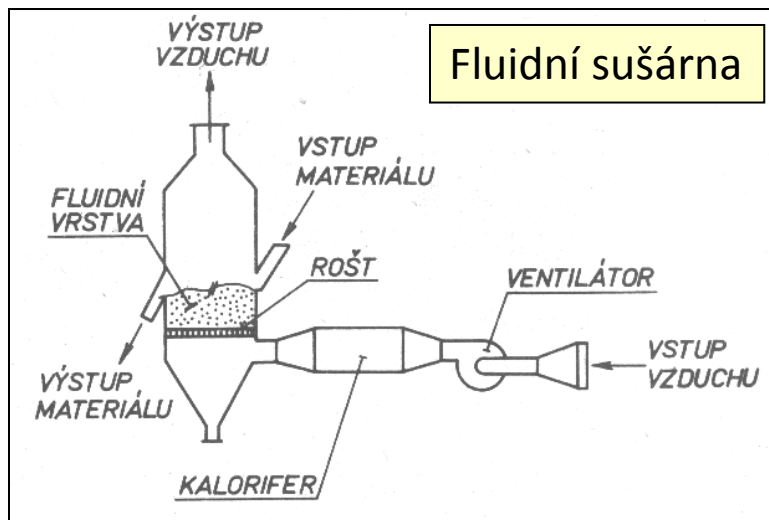
## 18. Materiálová a entalpická bilance kontinuální protiproudé sušárny a kaloriferu. Konstrukce některých sušáren.



$$\dot{m}_A = \dot{m}_B(U_{Ae} - U_{Ai}) = \dot{m}_C(W_{Ai} - W_{Ae})$$

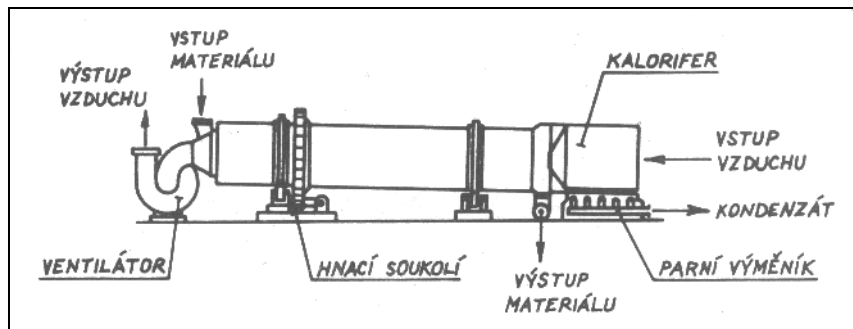
$$\dot{Q}_i = \dot{m}_B(I_e - I_i) + \dot{m}_C(I_{me} - I_{mi}) + \dot{Q}_z$$

# 18. Materiálová a entalpická bilance kontinuální protiproudé sušárny a kaloriferu. Konstrukce některých sušáren.



# 18. Materiálová a entalpická bilance kontinuální protiproudé sušárny a kaloriferu. Konstrukce některých sušáren.

## Tunelová sušárna



19. Pojmy: reakční rychlost, řád reakce, rozsah reakce, konverze složky, rychlostní a rovnovážná konstanta. Závislost reakční rychlosti na teplotě. Materiálové bilance vsádkového reaktoru.

$$\dot{n}_{Ai} + \int_0^V r_A dV = \dot{n}_{Ae} + \frac{dn_A}{dt}$$

$$r_A = \frac{1}{V_s(\tau)} \frac{dn_A}{d\tau} = \nu_A r \qquad r_A = \frac{dc_A}{d\tau} \quad [V_s = \text{konstantní}]$$

- změna látkového množství složky A v jednotkovém objemu reakční směsi  $V_s$  s časem

Reakční rychlost  $r$

$$r = k(T) \prod_{j=1}^S c_j^{a_j}$$

$$\text{např. } r = kc_A \qquad r = kc_A^2$$

$$r = kc_A c_B$$

(homogenní reakce)

Rychlostní konstanta

$$k = k_\infty \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

$k$  - rychlostní konstanta

$k_\infty$  - frekvenční faktor

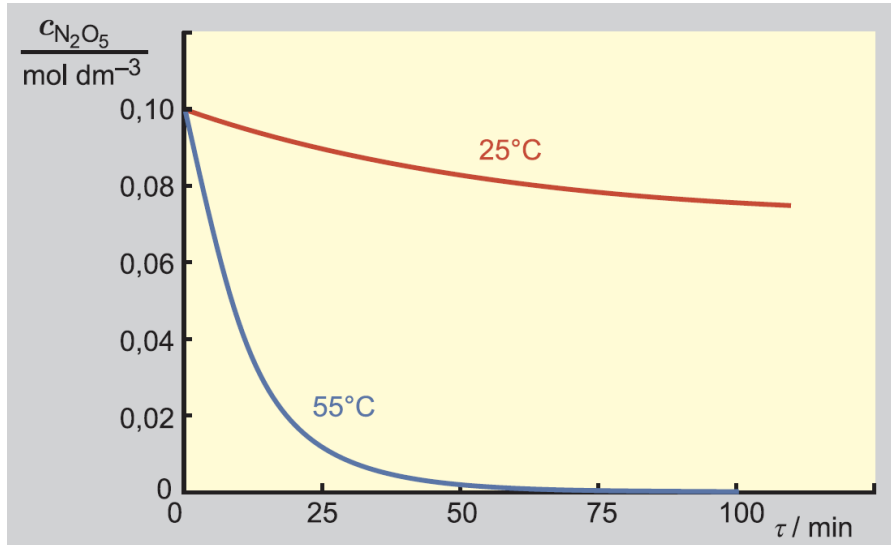
$E$  - aktivační energie

$T$  - teplota

$R$  - plynová konstanta

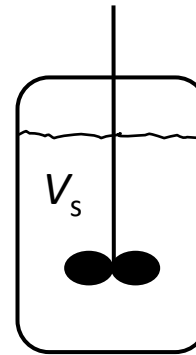
19. Pojmy: reakční rychlost, řád reakce, rozsah reakce, konverze složky, rychlostní a rovnovážná konstanta. Závislost reakční rychlosti na teplotě. Materiálové bilance vsádkového reaktoru.

Závislost reakční rychlosti na teplotě



$$\frac{k(T)}{k(T_0)} = \exp\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

Vsádkový reaktor



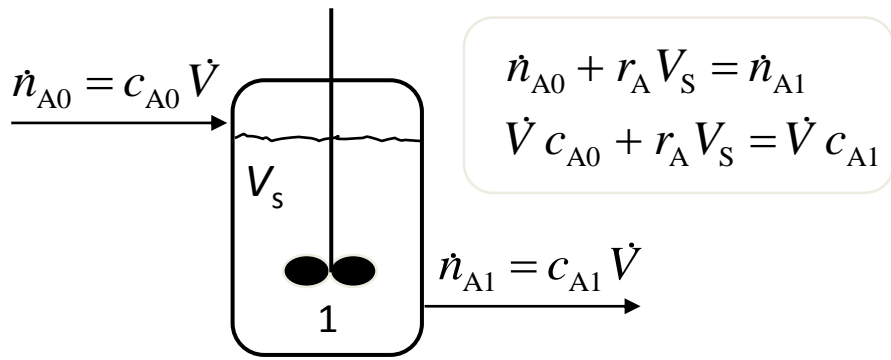
$$r_A V_s = \frac{dn_A}{d\tau}$$

Doba reakce

$$\tau = \frac{1}{v_A} \int_{c_{A0}}^{c_{Ak}} \frac{dc_A}{r}$$

## 20. Materiálové bilance průtočného ideálně promíchaného reaktoru a trubkového reaktoru.

### Průtočný ideálně míchaný reaktor



$$\begin{aligned} \dot{n}_{A0} + r_A V_S &= \dot{n}_{A1} \\ \dot{V} c_{A0} + r_A V_S &= \dot{V} c_{A1} \end{aligned}$$

Střední doba prodlení

$$\tau = \frac{V_S}{\dot{V}}$$

Doba reakce

$$\tau = \frac{c_{A0} - c_{A1}}{-r_A}$$

### Trubkový reaktor

$$d\dot{n}_A = \frac{d\dot{n}_A}{d\tau} = r_A dV_S = S r_A dz$$

$$V_s = \int_{\dot{n}_{A0}}^{\dot{n}_{AL}} \frac{d\dot{n}_A}{v_A r} = -\dot{n}_{A0} \int_0^{\zeta_{AL}} \frac{d\zeta_{AL}}{v_A r}$$

