

6. Prednáška

Tok tekutiny vrstvou nehybných častíc

Filtrácia, Fluidizácia

Tok tekutiny vrstvou nehybných častíc

Cieľom: návrh veľkosti zariadenia (reaktory s vrstvou katalyzátora, kolóny pre sušenie plynov, filtračné zariadenia...)

Model toku – fyzikálna predstava:

- Tekutina preteká vo vrstve rôznymi kanálíkmi, ktoré sú vytvorené medzi časticami
- Jednotný opis kanálikov - **dĺžka kanálikov h (\equiv výška vrstvy)**
- **ekvivalentný priemer kanálika d_{ek}**
- Disipácia mechanickej energie - **Darcyho rovnica**

$$\varepsilon_{dis} = \lambda_v \frac{hw_k^2}{2d_{ek}}$$

Vyjadriť vlastnosti
kanálikov

$$d_{ek}, w_k$$

Vlastnosťami častíc, z ktorých
vrstva pozostáva

$$d_{ec}, \varepsilon, \Phi, w$$

Tok tekutiny vrstvou nehybných častíc - pokračovanie

Medzerovitost' vrstvy častíc

V_m – objem medzier, V_v – objem kom. vrstvy častíc

$$\varepsilon = \frac{V_m}{V_v} = \frac{nS_k}{S}$$

Vyjadrenie $w_k = f(w)$:

$$w_k = \frac{w}{\varepsilon}$$

n – počet kanálikov;

S – prierez zariadenia; w – rýchlosť tekutiny vo voľnom priereze zariadenia (mimo-vrstvová rýchlosť’);

S_k – prierez kanálika; w_k – rýchlosť tekutiny v kanáliku (medzerová rýchlosť’)

Vyjadrenie $d_{ek} = f(d_{ec})$:

$$d_{ek} = 4 \frac{S_{skut}}{O_{zmac}} = 4 \frac{nV_k}{nA_k}$$

$$nA_k = nA_c$$

$$nV_k = V_m$$

$$\phi = \frac{A_g}{A_c}$$

$$\dot{V} = Sw = nS_k w_k$$

$$d_{ek} = \frac{2\varepsilon d_{ec} \Phi}{3(1-\varepsilon)}$$

$$\varepsilon_{dis} = \lambda_v \frac{hw_k^2}{2d_{ek}}$$

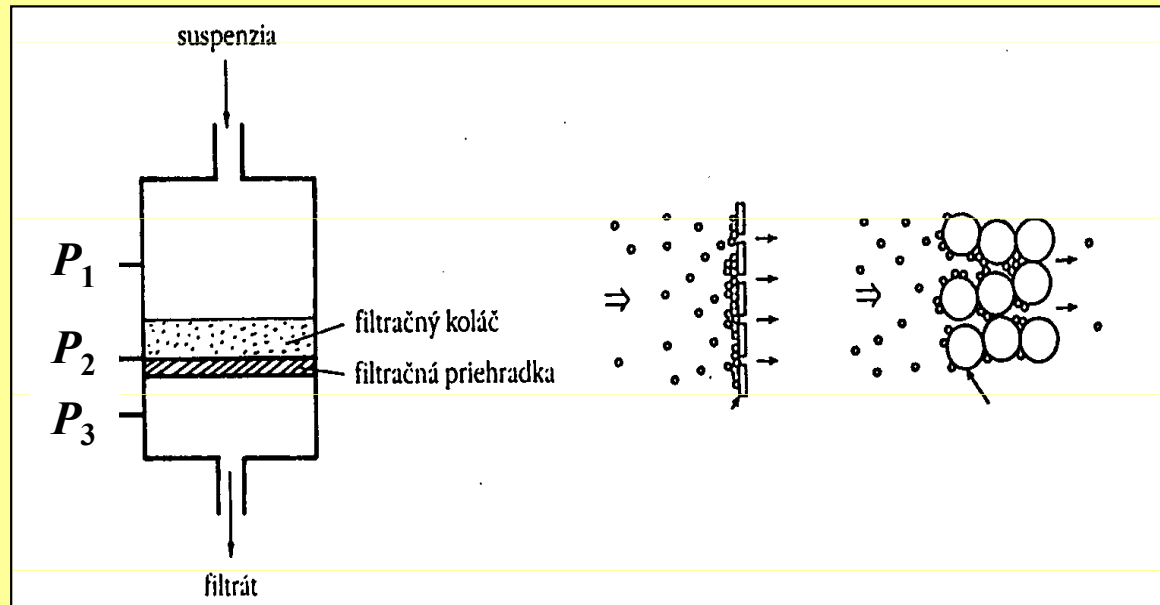
$$\varepsilon_{dis} = \lambda_v \frac{hw^2 3(1-\varepsilon)}{2d_{ec} 2\Phi \varepsilon^3}$$

$$\lambda_v = \frac{133}{Re_{ek}} + 2,33$$

$$Re_{ek} = \frac{d_{ek} w_k \rho}{\mu}$$

Filtrácia

Spôsoby filtrácie:



a) Koláčová
filtrácia

b) Povrchová
filtrácia

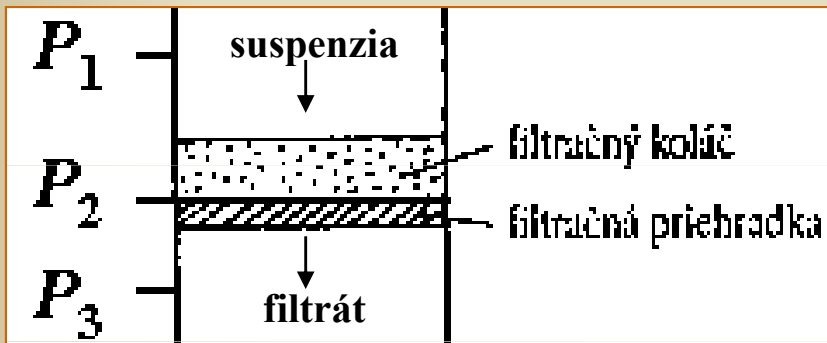
c) Hĺbová
filtrácia

!!!

Hnacia sila filtrácie

Nárast hrúbky koláča → **Nárast odporu voči toku filtrátu**

Filtrácia – model koláčovej filtrácie



Fyzikálna predstava filtrácie :

Model toku tekutiny cez vrstvu nehybných častíc
(filtráčny koláč - filtrát preteká v kanálikoch koláča)

Disipácia mechanickej energie tekutiny vo filtračnom koláči:

$$\varepsilon_{dis} = \frac{(-\Delta P)}{\rho} = \lambda_v \frac{3hw^2(1-\varepsilon)}{4d_{ec}\varepsilon^3\Phi}$$

ΔP – strata tlaku tekutiny vo filt. koláči

w – mimovrstvová rýchlosť tekutiny

$\varepsilon, \Phi, d_{ec}$ – vlastnosti častíc filt. koláč

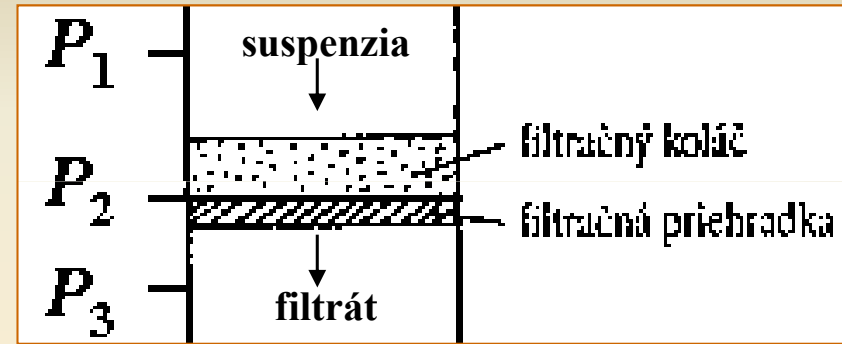
λ_v - súčiniteľ odporu častíc tvoriacich koláč

$$\lambda_v = \frac{133}{Re_{ek}} + 2,33$$

zanedbateľný

$$Re_{ek} = \frac{d_{ek} w_k \rho}{\mu} = \frac{2\varepsilon d_{ec} \phi}{3(1-\varepsilon)} \frac{w \rho}{\varepsilon \mu}$$

Filtrácia



$$\lambda_v = 200 \frac{(1 - \varepsilon) \mu}{d_{ec} \Phi w \rho}$$

$$\varepsilon_{dis} = \frac{(-\Delta P)}{\rho} = \lambda_v \frac{3hw^2(1 - \varepsilon)}{4d_{ec} \varepsilon^3 \Phi}$$

Pokles tlaku v tekutine pri toku
filtračným koláčom

Pokles tlaku v tekutine pri toku
filtračnou priehradkou

$$P_1 - P_2 = \alpha h \mu w$$

$$P_2 - P_3 = R w$$

R – odpor filtračnej priehradky

$$\alpha = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{d_{ec}^2 \Phi^2 \varepsilon^3}$$

Celkový pokles tlaku v tekutine

α – špecifický odpor
filtračného koláča

$$P_1 - P_3 = (\alpha h \mu + R) w$$

Filtrácia

Závislosť výšky filtračného koláča h od objemu filtrátu V_F

$$P_1 - P_3 = (\alpha h \mu + R) w$$

$$h = \frac{V_k}{S} = \frac{V_k}{S} \frac{V_F}{V_F} = \beta \frac{V_F}{S}$$

V_k – objem filt. koláča

V_F – objem filtrátu

β – relatívny objemový zlomok koláča

Rýchlosť filtrácie
zariadenia

$$\frac{1}{S} \frac{dV_F}{d\tau} = w$$

rýchlosť vo voľnom
priereze

$$\beta = \frac{V_k}{V_F}$$

$$\frac{1}{S} \frac{dV_F}{d\tau} = \frac{P_1 - P_3}{\alpha \beta \mu \frac{V_F}{S} + R}$$

Rýchlostná rovnica filtrácie

R, α, β – určíme
experimentálne

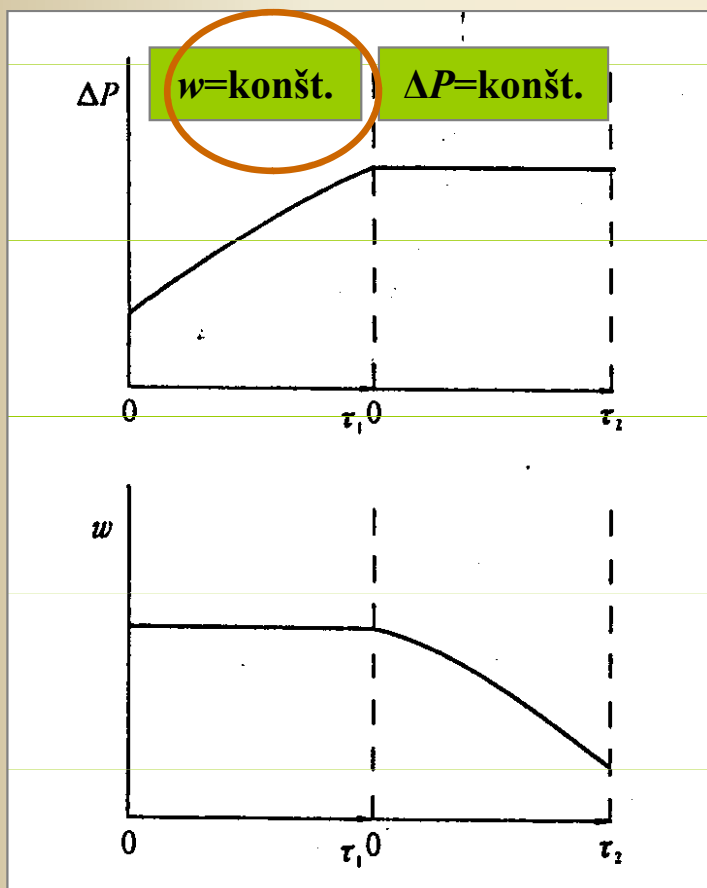
Filtrácia s konštantnou rýchlosťou

Nárast odporu filt. koláča sa kompenzuje zväčšovaním tlakového rozdielu pred filt. koláčom a za filtrom

$$\frac{1}{S} \frac{dV_F}{d\tau} = \frac{P_1 - P_3}{\alpha\beta\mu \frac{V_F}{S} + R}$$

Rýchlostná rovnica filtrácie

! $(P_1 - P_3)$ - maximálna hodnota (pevnosť filt. priehradky, nádoby)



$$\frac{1}{S} \frac{dV_F}{d\tau} = w_{konst} = \frac{P_1 - P_3}{\alpha\beta\mu \frac{V_F}{S} + R}$$

Max. objem filtrátu

$$V_{F1} = \left(\frac{(P_1 - P_3)_{\max}}{w_{konst}} - R \right) \frac{S}{\alpha\beta\mu}$$

Max. trvanie filtrácie

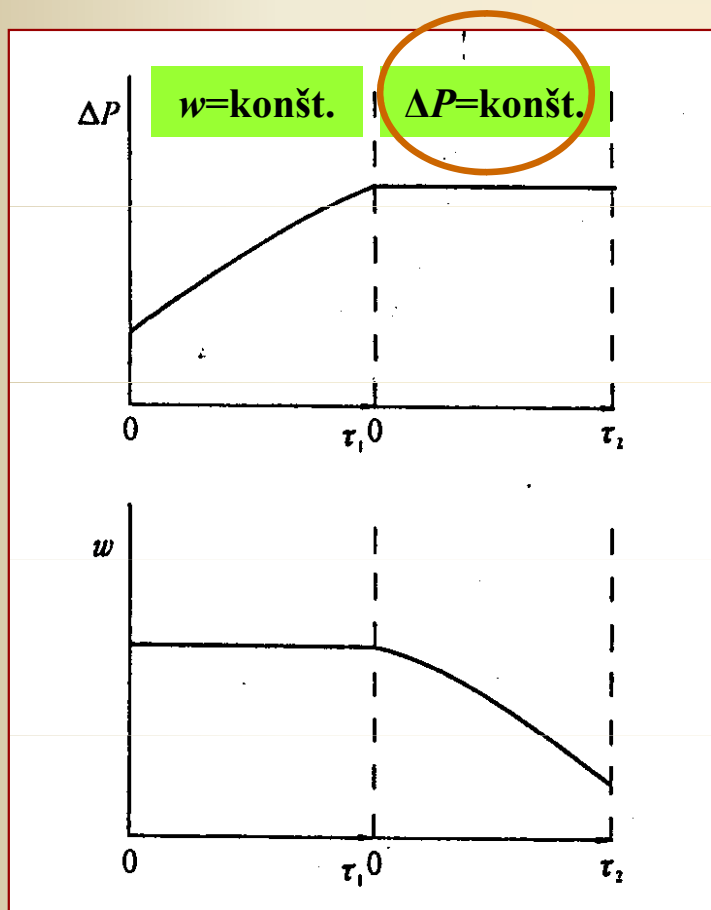
$$\frac{V_{F1}}{S w_{konst}} = \tau_1$$

Filtrácia s konštantným tlakovým rozdielom

$$\frac{1}{S} \frac{dV_F}{d\tau} = \frac{P_1 - P_3}{\alpha\beta\mu \frac{V_F}{S} + R}$$

Nárast odporu filt. koláča sa prejaví poklesom rýchlosti filtrácie

Rýchlostná rovnica filtrácie



Integrácia v hraniciach:

$$\begin{array}{ll} \tau = 0 & V_F = 0 \\ \tau = \tau_2 & V_F = V_{F2} \end{array}$$

Trvanie filtrácie

$$\tau_2 = k_1 \frac{V_{F2}^2}{S^2} + k_2 \frac{V_{F2}}{S}$$

V_{F2} – objem filtrátu získaný za čas - τ_2

$$k_1 = \frac{\alpha\beta\mu}{2(P_1 - P_3)}$$

$$k_2 = \frac{R}{P_1 - P_3}$$

Filtrácia

Filtračný koláč nestlačiteľný :

- Pri zvýšení tlaku sa **nemenia** charakteristiky filt. koláča
 $\varepsilon = \text{konšt.}$, $\Phi = \text{konšt.}$
- $\Delta P = f(h)$ priamo úmerne
- Mechanicky pevné častice

α – špecifický odpor
filtračného koláča

$$\alpha = a \Delta P$$

Filtračný koláč stlačiteľný :

- Pri zvýšení tlaku sa **menia** charakteristiky filt. koláča ε , Φ
- $\Delta P \neq f(h)$ vyšší nárast tlakovej straty
- Mechanicky častice nie sú pevné – používajú sa výstuže (piesok...)

$$\alpha = a \Delta P^b$$

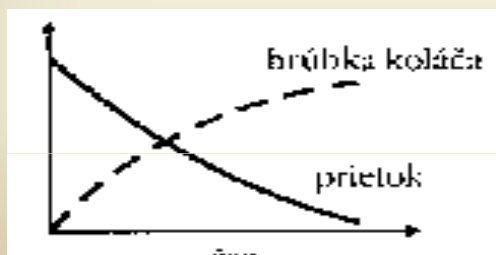
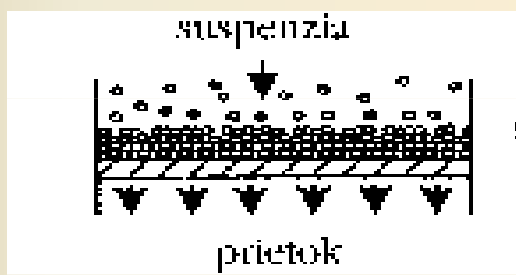
Membránová filtrácia

Filtračné membrány:

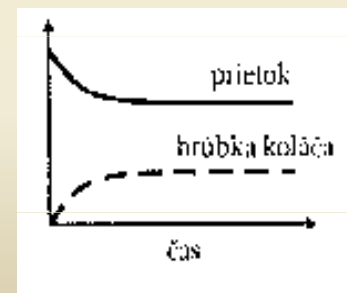
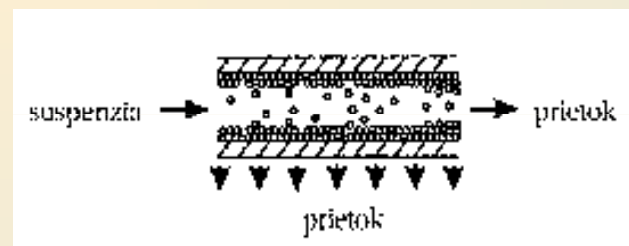
- **Rovnaká** veľkosť pórov (polyméry, ...)
- Malé rozmery pórov ($2 \cdot 10^{-8} \text{m}$ až 10^{-5}m - **mikrofiltrácia**)
- Chemické vlastnosti (vzájomné pôsobenie membrány a rozpúšťadla - **ultrafiltrácia**)
- Polopriepustné membrány (oddeľovanie rozpustených zložiek z rozpúšťadla – **prevrátená osmóza**)

Spôsoby membránovej filtrácie:

Povrchová filtrácia
(čistý filtrát + filtračný koláč)



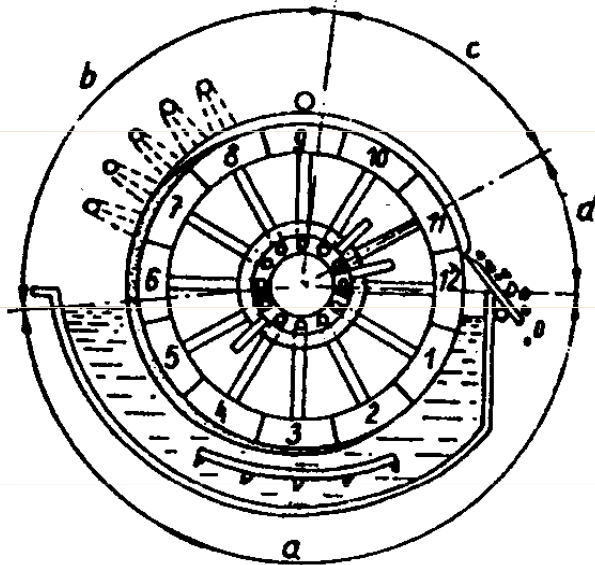
Filtrácia s krížovým tokom
(čistý filtrát + zahustená suspenzia)



Filtračné zariadenia

Filtračný cyklus - etapy:

Tvorba filtračného koláča; Premývanie filtračného koláča kvapalinou; Odstránenie premývacej kvapaliny z filtračného koláča; Odstránenie filtračného koláča; Regenerácia filtračnej priehradky



Bubnový vakuový filter:

a — filtrácia, b — promývanie, c — sušenie,
d — odstraňovanie koláče

Kontinuálne pracujúce zariadenia

Výhody: vysoký výkon, nastaviteľná hrúbka filt. koláča, meniteľná frekvencia

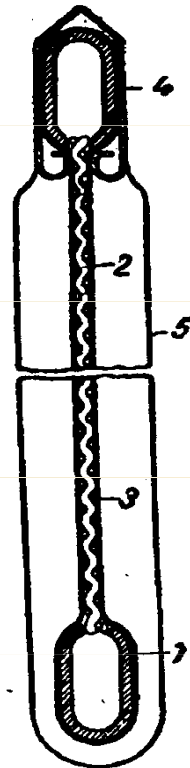
Nevýhody: vysoké obstarávacie náklady (papierenský priemysel)

Filtračné zariadenia

Periodicky pracujúce zariadenia

Článok listového filtru

- 1 dutý rám
- 2 drátěná sieťka
- 3 filtrační tkanina
- 4 svorka
- 5 filtrační koláč.

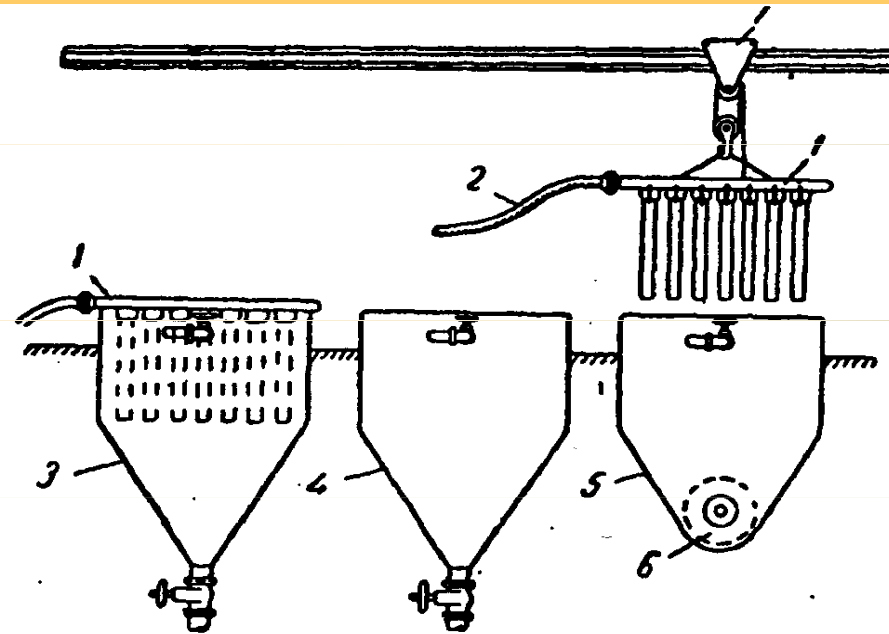


Podtlak vo fitri:

Kvapalina vniká do filtra, na filt. tkanine 5-35 mm kalu

Pretlak v suspenzii (podtlak vo fitroch

Kvapalina vniká do filtra, koláč sa vytvára na filt. tkanine



Listový filtr:

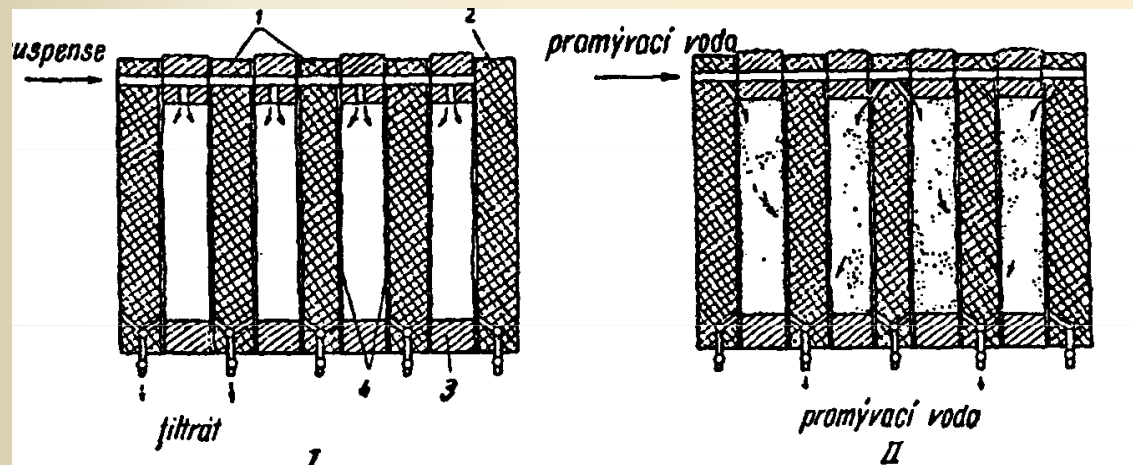
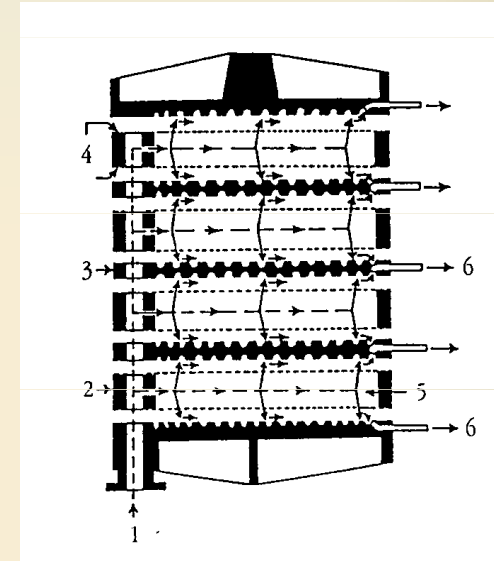
1 — filtrační článok; 2 — hadice na spojení s vakuovým alebo tlakovým potrubím; 3 — nádrž na filtraci; 4 — nádrž na promývání koláče; 5 — nádrž na odstraňování koláče; 6 — žnek na odvádění ssedliny; 7 — visuté dopravní zařízení.

Filtračné zariadenia

Periodicky pracujúce zariadenia

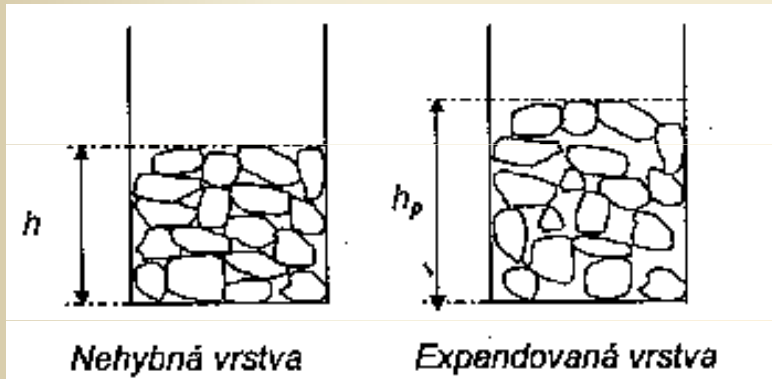
Kalolisy – tlakové tkanivové filtre

Striedavo uložené rámy a perforované dosky s filtračnou tkaninou. Ssuspenzia sa vháňa pod tlakom, filtrát vyteká z vnútra dosiek, filtračný koláč vyplňa priestor v rámoch – obr I. Premývanie filt. koláča – cez perforované dosky – obr II. Demontáž a odstránenie filtračného koláča!



Fluidizácia

Fluidná vrstva - Suspenzia tuhých častíc vznášajúcich sa v prúde tekutiny (l,g)



Vlastnosti fluidnej vrstvy:

- Vykazuje hydrostatický tlak na dno nádoby
- Charakterizovaná je definovateľnou hladinou
- Na pohľad sa správa ako vriaca tekutina
- Dá sa „prelievať“ z jednej nádoby do druhej
- Dá sa transportovať potrubím

Využitie vlastností fluidnej vrstvy:

Veľký stykový povrch medzi tuhými časticami a tekutinou – v difúzných a katalitických procesoch

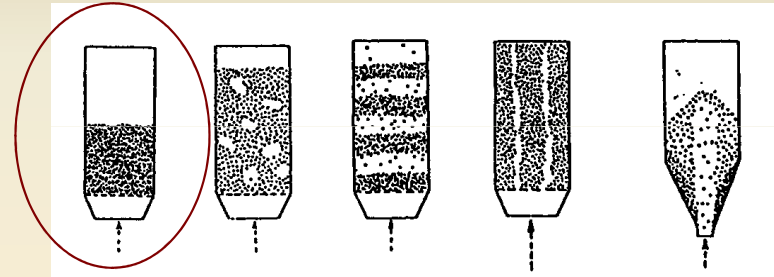
Intenzívna cirkulácia tuhej fázy – v procesoch spojených s výmenou tepla a látky, v katalytických procesoch (sušenie práškových materiálov)

Lacný a pohodlný transport malých častíc

Fluidizácia

Nevýhody:

- Obmedzený rozsah rýchlostí
- Nerovnomernosti vo fluidnej vrstve
- Oter tuhých častíc
- Erózie aparatury a potrubia



Fluidná vrstva rovnomerná, bublajúca, piestujúca, kanáliková a tryskajúca

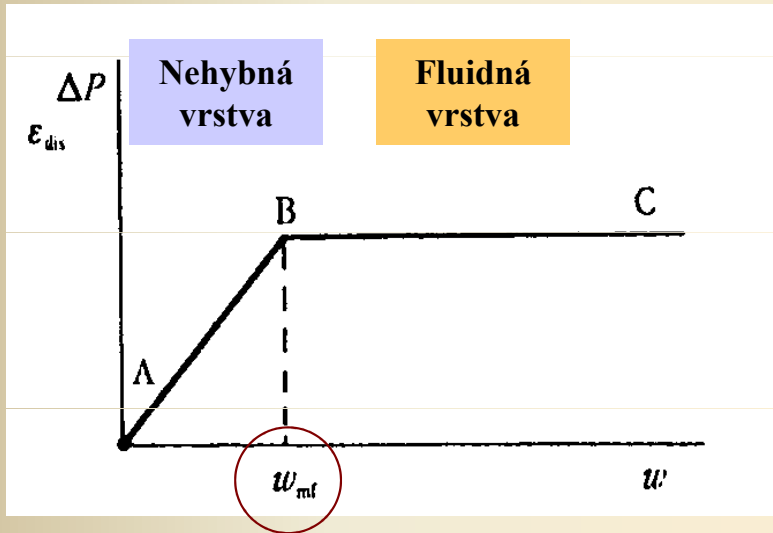
Froudeho číslo: Podmienka rovnomernej fluidnej vrstvy

$$Fr = \frac{w_{mf}^2}{gd_c} < 1$$

w_{mf} – prahová rýchlosť fluid.
 d_c – priemer častíc

Fluidizácia

Pokles tlaku vo fluidnej vrstve, disipácia energie



Pokles tlaku a disipácia energie
v nehybnej a fluidnej vrstve

w_{mf} – prahová rýchlosť fluid.

$$f_t = hS(1 - \epsilon)\rho_c g$$

Objem kompaktnej
vrstvy častíc

$$f_v = hS(1 - \epsilon)\rho g$$

$$f_o = S\Delta P$$

$$f_t - f_v = f_o$$

$$\Delta P = h(1 - \epsilon)(\rho_c - \rho)g$$

$$\epsilon_{dis} = h(1 - \epsilon)\frac{(\rho_c - \rho)}{\rho}g$$

Vzťahy platia v rozsahu prahovej
rýchlosti fluid. po úletovú rýchlosť

Fluidizácia

Prahová rýchlosť fluidizácia

Pri prahu fluidizácie platí:

Disipácia energie v nehybnej vrstve = Disipácia vo fluidnej vrstve

Mimovrstvová rýchlosť v nehybnej vrstve = rýchlosť vo fluidnej vrstve

$$\varepsilon_{dis} = \lambda_v \frac{hw^2 3(1-\varepsilon)}{2d_{ec} 2\Phi\varepsilon^3}$$

$$\varepsilon_{dis} = h(1-\varepsilon) \frac{(\rho_c - \rho)}{\rho} g$$

$$\lambda_v = 200 \frac{(1-\varepsilon)\mu}{d_{ec}\Phi w\rho}$$

$$w_{mf} = 0,0067 \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1-\varepsilon_{mf}} \frac{d_c^2 (\rho_c - \rho) g}{\mu}$$

ε_{mf} medzerovitost' pri prahu fluidizácie

Vzťah odvodený pre **laminárny tok** vrstvou

Pre **nelaminárny tok** vrstvou

$$Ar = 150 \frac{1-\varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} + \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}} Re_{mf}^2$$

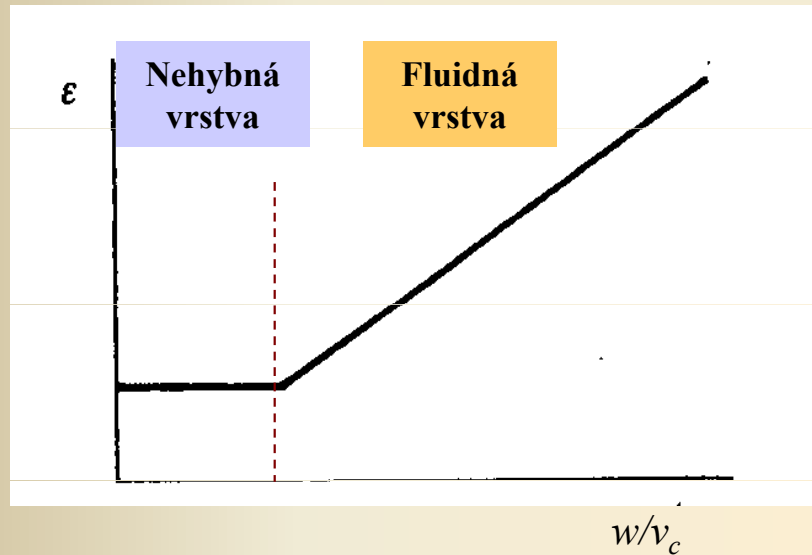
$$Ar = \frac{d_c^3 (\rho_c - \rho) \rho g}{\mu^2}$$

w_{mf}

$$Re_{mf} = \frac{w_{mf} d_c \rho}{\mu}$$

Fluidizácia

Expanzia fluidnej vrstvy



$$\frac{w}{v_c} = \epsilon^n$$

n – expanzný faktor
(experimentálne)

Expanzia rovnomerne fluidizovanej vrstvy (log závislosť)